

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

**Vliv neizokinetického odběru na stanovení
koncentrace prachu na prašné trati**

**Influence of Non-kinetic Sampling for
Determination of the Dust Concentration
on a Dirt Track**

Student:

Bc. Čumpl Martin

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Bojko Marian, Ph.D.

Ostrava 2013

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5. 2013



Prohlášení

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena na Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávnění užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2013



podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:

Stonařov 254

58833 Stonařov

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli oporou při tvorbě diplomové práce a především svému vedoucímu práce Ing. Marianu Bojkovi, Ph.D.. Bez jeho cenných rad a pomoci by tvorba této práce byla o hodně náročnější.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Čumpl**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Vliv neizokinetického odběru na stanovení koncentrace prachu na prašné trati**
Influence of Non-kinetic Sampling for Determination of the Dust Concentration on a Dirt Track

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše k problematice měření koncentrace prachu a vícerozměrné proudění skutečných plynů včetně proudění pevných částic (diskrétní fáze).
2. Definování matematického modelu proudění plynné směsi s diskrétní fází pevných částic v prašné trati.
3. Vytvoření 2D osově symetrického modelu výpočetní oblasti, stanovení okrajových podmínek pro plynnou směs a pevné částice, aplikace matematického modelu.
4. Stanovení koncentrace prachu včetně vlivu rozdílné granulometrie prachu, vliv přesátí a podsátí na koncentraci prachu.
5. Vyhodnocení proudění plynné směsi a pevných částic (vyhodnocení základních proudových veličin).

Seznam doporučené odborné literatury:

1. KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění FLUENT, CFX*, VŠB-TU Ostrava, 2008, 142 s.
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>.
2. BOJKO, M.: *Návody do cvičení „Modelování proudění“ - FLUENT*, VŠB-TU Ostrava, 2008, 141 s.
ISBN 978-80-248-1909-9.
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/Bojko-Fluent.pdf>>
3. FLUENT: *Fluent 13.0 - ANSYS FLUENT Theory Guide*, ANSYS, Inc. 2010.
4. BOJKO, M.: *3D proudění – Ansys Fluent učební text*, VŠB-TU Ostrava, 2012, 314 s. ISBN 978-80-248-2607-3. <<http://www.338.vsb.cz/PDF/3D-Bojko.pdf>>
5. KOVÁŘ, R.: *Vliv ne-izokinetiky odběru vzorku na stanovení koncentrace TZL*. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, 2011, 66 s.
6. ISO 9096 Stacionární zdroje emisí – Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých

částic v potrubí – Manuální gravimetrická metoda

7. ČSN EN 13284-1 Stacionární zdroje emisí – Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu – Manuální gravimetrická metoda.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. František Hopan, Ph.D.

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Čumpl, M. *Vliv neizokinetického odběru na stanovení koncentrace prachu na prašné trati: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2012, 58 s. Vedoucí práce: Bojko, M.

Diplomová práce se zabývá numerickým modelováním proudění vzduchu a pevných částic na prašné trati. V úvodu je popsána metoda experimentálního měření koncentrace pevných částic gravimetrickou metodou. V práci je nadefinován matematický model proudění v prašné trati, která je umístěna ve Výzkumném energetickém centru VŠB – Technické univerzity Ostrava. Práce obsahuje definici matematického modelu a jeho aplikaci na experimentálním zařízení prašné trati. Hlavní náplní diplomové práce je použití matematického modelu proudění na prašné trati při neizokinetickém odběru pevných částic při přesátí a podsátí. V poslední fázi diplomové práce je vyhodnoceno proudové pole pomocí grafického zobrazení základních veličin (tlak a rychlost), a rozložení koncentrací pro matematické modelování proudění o různých velikostech prachových částic. Výpočtový model je vytvořen jako 2D osově symetrický.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ČUMPL, M. *Influence of Non-kinetic Sampling for Determination of the Dust Concentration on a Dirt Track: Master Thesis*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2012, 58 p. Thesis head: Bojko, M.

The master thesis deals with the numerical modeling of airflow and particle on a dirt track. The introduction describes the method of experimental measurement of the concentration particulate gravimetric method. In the work is defined mathematical model of flow in dirt track, which is located in the Energy Research center VSB – Technical University of Ostrava. The work includes the definition of a mathematical model and its application to an experimental device dirt track. The main contents of the thesis is to use a mathematical model of flow on a dirt track of Non-kinetic collection of solid particles in a pressure vacuum. In the last phase of diploma thesis is evaluation of flow field using a graphical display of basic variables (pressure and velocity), and the distribution of concentrations for mathematical modeling of the flow of dust particles of different sizes. The calculation model is formed as a 2D axially symmetric.

Obsah

Seznam použitého značení	10
1. Úvod.....	12
2. Vlastnosti tuhých částic	14
2.1 Zdroje znečištění venkovního ovzduší	15
2.2 Rozdělení prachu podle obsažených škodlivin.....	16
2.3 Účinek prachových částic na lidské zdraví.....	17
2.4 Dopady na životní prostředí	18
3. Experimentální odběr vzorku tuhých znečišťujících látek	19
3.1 Charakteristika gravimetrických metod	19
3.2 Typy odběrových sond.....	21
3.3 Zahájení, průběh a ukončení odběru vzorku	22
3.4 Experimentální stanovení koncentrace prachu na prašné trati	23
3.5 Definování vstupních parametrů pro matematické modelování.....	27
4. Matematické modelování proudění	28
4.1 Metoda konečných objemů.....	28
4.2 Více fázové modely.....	30
4.3 Euler – Lagrangeův přístup	31
4.4 Trajektorie pevných částic v plynu	31
4.5 Definování matematického modelu proudění plynné směsi s prachovými částicemi na prašné trati	34
5. Tvorba geometrie a výpočetní sítě	34
5.1 Postup přípravy geometrie a výpočetní sítě prašné trati	35
5.2 Tvorba geometrie výpočetní oblasti v programu DesingModeler.....	35
5.3 Tvorba výpočetní sítě ve výpočetní oblasti.....	36
6. Aplikace definovaného matematického modelu na prašnou trať	39
6.1 Nastavení matematického modelu, okrajových podmínek.....	40

7.	Vyhodnocení výsledků numerické simulace	42
7.1	Vytvoření řezů	42
7.2	Proudění vzduchu bez prachových částic (varianta 1)	44
7.3	Tabulka vypočtených hodnot při proudění vzduchu.....	48
7.4	Nastavení izokinetického proudění (Varianta 2)	49
7.5	Proudění vzduchu s částicemi (varianta 3).....	51
7.6	Zobrazení výsledků numerické simulace s pevnými částicemi v proudovém poli.....	52
8.	Závěr.....	59
9.	Literatura	61
10.	Seznam příloh.....	63

Seznam použitého značení

a	rozměr částice	[m]
a_1	konstanta pro určitý rozsah Re	[1]
a_2	konstanta pro určitý rozsah Re	[1]
a_3	konstanta pro určitý rozsah Re	[1]
c	koncentrace složky	[kg · m ⁻³]
c_D	koeficient hydrodynamického odporu	[1]
$c_{\text{měř}}$	koncentrace změřená na výstupu z odběrové sondy	[kg · m ⁻³]
c_{ref}	referenční hodnota koncentrace na prašné trati	[kg · m ⁻³]
d	skutečný průměr prašné trati	[m]
D	difuzní koeficient	[1]
D_p	průměr částic	[m]
F	součinitel tvaru	[1]
F_D	síla hydrodynamického objemu	[N]
F_x	vnější objemová síla	[N]
l	délka matematického modelu	[m]
$\varnothing d_{s1}$	světlost odběrové sondy	[m]
$\varnothing d_{s2}$	vnější průměr odběrové sondy	[m]
p	křivka četnosti	[μm ⁻¹]
P	křivka propadu	[1]
P_{dyn}	dynamický tlak	[Pa]
P_{stat}	statický tlak	[Pa]
P_{tot}	totální tlak	[Pa]
Q_m	hmotnostní průtok	[kg · m ⁻³]
$Q_{m, \text{tekutiny}}$	hmotnostní průtok tekutiny	[kg · s ⁻¹]

$Q_{m, \text{částic}}$	hmotnostní průtok částic	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
Q_v	objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}]$
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
S	zdroj	[1]
s	plocha částice pokud je tvar kulový	$[\text{m}^2]$
S	skutečná plocha částice	$[\text{m}^2]$
u	rychlost proudění	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
u_p	rychlost částic	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v	rychlost proudění vzduchu na vstupu prašné trati	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_a	rychlost proudění vzduchu v potrubí	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_N	rychlost proudění vzduchu v ústí sondy	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
z	křivka zbytků	[1]
μ	molekulární viskozita kapaliny	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
δ	tloušťka stěny	[m]
ν	kinematická viskozita vzduchu	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
ρ_p	hustota částic	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ	hustota vzduchu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

Zkratky:

TZL

tuhé znečišťující látky

1. Úvod

Tuhé znečišťující látky jsou drobné částice pevného skupenství rozptýlené ve vzduchu. Jedná se o tak malé částice, že mohou být unášeny vzduchem. Jejich počet a velikost může způsobit zdravotní potíže nebo dokonce změnu počasí. Tuhé znečišťující látky lze rozdělit podle vzniku, složení a velikosti do různých kategorií.

Stanovit koncentraci tuhých znečišťujících látek lze měřením (experimentálně na prašné trati) nebo pomocí matematického modelování. Při použití experimentálního měření je základní metodou metoda gravimetrická. Při této metodě je základní prvek odběrová sonda, která slouží k odběru vzorku prachu. Odběrová sonda má předem stanovené rozměry a existuje jich celá řada dané normou. Základní typy odběrových sond jsou v diplomové práci blíže popsány. Gravimetrická metoda spočívá v zachycování částic ve filtru, které jsou odebrány pomocí odběrové sondy, a následným vážením se určí koncentrace tuhých znečišťujících látek. Experimentální zařízení, které je umístěno ve Výzkumném energetickém centru VŠB – Technické univerzity Ostrava je v diplomové práci blíže popsáno. Hlavní částí diplomové práce je definování matematického modelu proudění vzduchu s částicemi na prašné trati. Jedná se o numerickou metodu stanovení koncentrace tuhých znečišťujících látek. Matematický model vyžaduje přesné nadefinování veličin jako skutečná měřící aparatura. Jedná se o nadefinování okrajových podmínek, vlastnosti prachových částic, fyzikální vlastnosti atd. K matematickému modelování byl pro diplomovou práci vybrán programový software Ansys Fluent, který je součástí softwaru Ansys. Referenční bod měření je izokinetický poměr. Ten nastává, pokud rychlost proudění v ústí sondy a okolo ní je stejná.

Proudění v prašné trati je definováno jako vícefázové proudění. Jedná se tedy o proudění více látek (vzduch + pevné částice). V diplomové práci je popsána tvorba geometrie, sítě, matematického modelu a nastavení okrajových podmínek. K matematickému modelování byl vytvořen 2D zjednodušený osově symetrický model pro prašnou trať. 2D model byl vytvořen z důvodu symetrického tvaru prašné trati. V první fázi byly provedeny výpočty prašné trati za neizokinetických podmínek. Byl nastaven nulový přetlak na výstupu z prašné trati i z odběrové sondy. Při tomto nastavení byly provedeny výpočty všech modelů pro turbulentní proudění. Jedná se o turbulentní modely $k - \varepsilon$ a $k - \omega$. Druhá fáze byla zaměřena na ladění izokinetického poměru v ústí odběrové sondy. Byl měněn tlak na výstupu z odběrové sondy a po dosažení stejné rychlosti v ústí a okolo odběrové sondy byla tato hodnota jako referenční. Další fáze spočívala v nadefinování pevných částic. Nadefinování částic je v diplomové práci podrobně popsáno. Výpočty byly provedeny pro velikosti částic 10 μm , 50 μm a 100 μm . Numerické

modelování spočívalo ve změně kinetického poměru, resp. podsátí a přesátí, který byl ovládán tlakem na výstupu z odběrové sondy.

Na závěr diplomové práce byly prezentovány výsledky numerického výpočtu proudového pole na prašné trati. V první části byly výsledky vytvořeny pro všechny matematické modely. Byla vytvořena tabulka s vybranými hodnotami tlaků a rychlosti. Výsledky jsou zobrazeny graficky a taky pomocí grafu. V další části byly do matematického modelu přidány částice a vyhodnoceny graficky, pomocí tabulek i grafů. Ostatní výpočty jsou vyhodnoceny a graficky zobrazeny v příloze.

2. Vlastnosti tuhých částic

V této kapitole je popsáno, jaký vliv má velikost částice na zdraví, přírodu a počasí. Vlastnosti tuhých částic lze rozdělit do mnoho odvětví. V této diplomové práci jsou popsány základní rozdělení. Nejdůležitější je rozdělení rozměrové. Posuzuje se jeho propustnost. Velikost má také velký vliv na zdraví. Tuhé znečišťující látky se dělí podle těchto kritérií:

- rozměrové
- fyzikální
- chemické

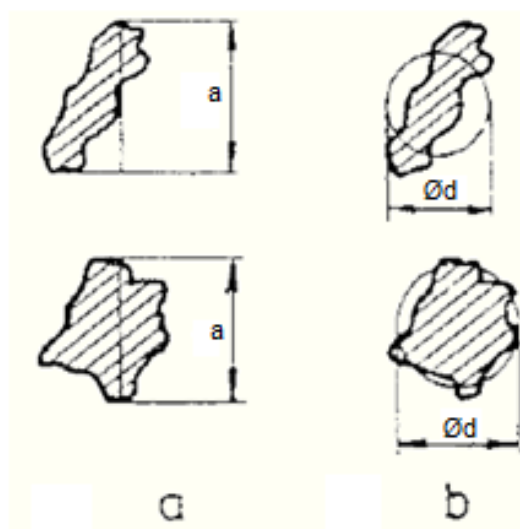
Rozměrové vlastnosti tuhých látek rozdělují částice do dvou stupňů:

- polydisperzní směs (směs o různých velikostech rozměrů – částice nejčastěji se vyskytující)
- monodisperzní směs (všechny částice mají stejnou velikost)

Specifický parametr tuhých látek je jejich velikost, kterou lze určit granulometrií částic. Lze definovat následující průměry:

a) Feretův průměr – největší rozměr částice ve zvoleném směru. Definice určení rozměru je na Obr. 2. 1 a.

b) průměr gratikulárního kruhu – kruh, který je nejbližší ploše částice, viz Obr. 2. 1 b

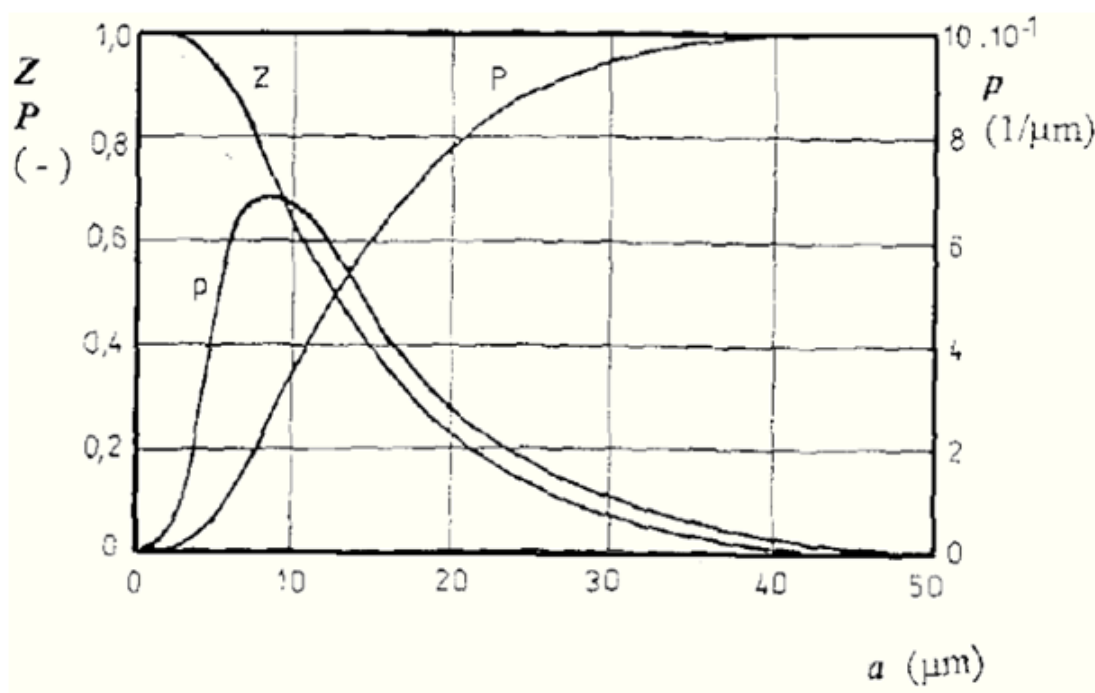


Obr. 2. 1 – Příklad určení velikosti částic [5]

K vyjádření složení jednotlivých frakcí částic jsou sestrojovány následující křivky:

- **křivka četnosti p** – udává poměrný počet (nebo hmotnost) částic určité velikosti ve vzorku ($1/\mu\text{m}$),
- **křivka zbytků Z (1)** – udává poměrný počet (nebo hmotnost) částic větších, než je příslušná částice a ,
- **křivka propadu P (1)** – udává poměrný počet (nebo hmotnost) částic menších, než je příslušná částice a .

Tyto křivky jsou zobrazeny na Obr. 2. 2.



Obr. 2. 2 – Křivka četnosti, zbytků a propadu [5]

2.1 Zdroje znečištění venkovního ovzduší

Zdroje znečištění venkovního ovzduší lze rozdělit do dvou skupin:

- přírodní znečištění
 - prach sopek, sirovodík a čpavek produkovaný bakteriemi
- umělé znečišťování
 - největší zdroj je výroba energie spalovacím procesem fosilních, kapalných a plyných paliv

Emisním procesem se rozumí práce znečišťování ovzduší. Následně se zavádí pojmy:

- emise – tok znečišťující látky do ovzduší (kg/s) - (pevné, kapalné, plynné),
- imise – koncentrace znečišťující látek v přízemních vrstvách ovzduší (už znečištěné ovzduší).

Podle zákona č. 86/2002 se zdroji znečišťování rozdělují podle příkonu a výkonu na:

- zvlášť velké - tepelný příkon vyšší než 50 MW,
- velké – tepelný příkon vyšší jak 5 MW,
- střední - tepelný příkon od 0,2 MW do 5 MW (sídliště),
- malé - tepelný příkon do 0,2 MW (škola),
- mobilní – silniční a kolejová vozidla, lodě a letadla.

Následné tuhé částice rozptýlené do ovzduší se rozdělují podle vzniku a složení:

- dým – jemné částice o velikosti 0,1 – 1 μm (svařování),
- kouř – velikost 0,01 – 0,5 μm (kouř z cigaret – nedokonalé spalování a obsahující převážně uhlík),
- popílek – velikost 1 – 100 μm (vzniklé při spalovacích procesech),
- aerosol – disperzní soustava jemných částic o velikosti 0,01 – 1 μm v plynu,
- prach – částice vzniklé převážně mechanickým působením (drcení, mletí, otěr).

Technické i přírodní procesy v biosféře produkují tuhé i kapalné částice, plyny a páry, které mohou znečišťovat ovzduší:

- technické – průmysl,
- přírodní – sopka.

2.2 Rozdělení prachu podle obsažených škodlivin

Dle obsahu škodlivých látek se prach rozděluje do dvou skupin:

- prach obsahující škodlivé složky,
 - těžké kovy (olovo, rtuť, arsen), vysoce toxické látky (radioaktivní a karcinogenní látky)
- prach bez toxických účinků,
 - fibrogení účinek – černé uhlí, šanot
 - dráždivý účinek – oxid vápenatý, cement, dřevěný prach

- bez fibrogenního a dráždivého účinku – hnědé uhlí, oxid železa, popílek.

Nejvyšší přípustná koncentrace – nezpůsobuje poškození lidského zdraví a v každé zemi EU je udána národními závaznými předpisy:

- emisní limit – nejvýše přípustné množství znečišťující látky vypouštěné ze zdroje do ovzduší,
- emisní strop – nejvýše přípustná úhrnná emise za období 1 roku (6 tun za rok tuhých částic).

Rozdělení znečišťujících látek je následující:

- základní – tuhé znečišťující látky (TZL) – SO_2 , NO_x a CO,
- karcinogenní,
- tuhé anorganické látky,
- plynné anorganické látky,
- organické plyny a páry,

Následně je definován registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší – REZZO.

- databáze zdrojů znečištění v ČR
- je rozdělena do 4 kategorií
 - REZZO 1 – velké stacionární zdroje
 - REZZO 2 – střední stacionární zdroje
 - REZZO 3 – malé stacionární zdroje
 - REZZO 4 – mobilní stacionární zdroje

2.3 Účinek prachových částic na lidské zdraví

Vliv na lidské zdraví má především velikost pevných prachových částic. Velké částice se zachycují v nose na chloupkách, nejsou pro člověka až tak nebezpečné. Malé částice se mohou usazovat na průduškách a způsobit zdravotní potíže, jedná se o částice menší než $10\ \mu\text{m}$. Nejhorší jsou částice o velikosti $1\ \mu\text{m}$, které mohou vstupovat až do plicních sklípků. Vdechování částic o velikosti $10\ \mu\text{m}$ poškozuje hlavně kardiovaskulární a plicní systém a může způsobit chronické plicní choroby. V důsledku adsorpce organických látek s mutagenními a karcinogenními účinky může expozice PM₁₀ způsobovat rakovinu plic. Tyto částice se také nazývají jako vdechované částice nebo thorakální částice (anglicky thoracicparticles) – z latinského thorax – hrudník. Velice nebezpečné jsou saze z dieselových automobilů, kdy se na plicích usadí polovina sazí. Průzkum dále

potvrdil, že u sazí otevřeného ohně se na plicích usazuje pouhá pětina. Je to způsobeno velikostí částic.

Ze zdravotního hlediska jsou částice obecně označovány jako PM_x , kde X označuje velikost částic v μm . Obvykle se stanovují částice o velikosti:

- **PM_{10}** – částice menší než 10 μm ,
- **$PM_{2,5}$** – částice menší než 2,5 μm ,
- **PM_1** – částice menší než 1 μm (méně často). [8]

2.4 Dopady na životní prostředí

V ovzduší je mnoho pevných částic o různých velikostech. Podle velikosti částice je rozdílná doba setrvání částice ve vzduchu. Částice o velikosti okolo 10 μm se usazují na povrch do několika hodin. Částice o velikosti okolo 1 μm mohou poletovat v atmosféře až několik týdnů, dokud nejsou mokrou depozicí odstraněny. Mezi hlavním rozdílem jemného a hrubého aerosolu je ve složení. Hrubý aerosol je tvořen zemskou kůrou a bioaerosem, zatímco jemný aerosol je tvořen hlavně sírany, organickým a elementárním uhlíkem a amonnými solemi. Aerosol může působit na organismy mechanicky zaprášením a to u rostlin a stromů snižuje zelnou plochu. U živočichů prach vstupuje do plic. Částice způsobují rozptýl slunečního záření do prostoru a ovlivňují energetickou bilanci Země. Pokud jsou ve velkém množství přítomny částice při tvorbě oblaků, bude se výsledný oblak skládat z velkého množství menších kapek. Tento oblak odráží sluneční záření daleko více, než oblak skládající se z částic větších. Vlivy na klima se projevují převážně v regionálním měřítku. [9]

Odběr tuhých znečišťujících látek je stanoven zákony a vyhláškami. Základní vyhlášky jsou:

„Zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů (zákon o ochraně ovzduší), ve znění pozdějších předpisů.

Vyhláška č. 356/2002 Sb., která mimo jiné stanovuje způsob zjišťování množství vypouštěných znečišťujících látek, obecné emisní limity a další.

Prováděcí předpisy zákona z emisní oblasti., stanovující specifické emisní limity a další podmínky provozu (spalovací zdroje, spalovny odpadu, ostatní technologické zdroje, zdroje emitující VOC).“ [10]

3. Experimentální odběr vzorku tuhých znečišťujících látek

Základní experimentální metoda stanovení koncentrace tuhých znečišťujících látek je gravimetrická metoda. Tuto metodu popisuje norma ČSN 834611. Tato metoda se používá pro měření podrobná, běžná i orientační z hlediska požadované přesnosti. Také lze použít pro měření arbitrážní, garanční, provozní, experimentální a pro účely zákona o ovzduší z hlediska účelu měření.

Stanovení koncentrace tuhých znečišťujících látek gravimetrickou metodou popisuje technická norma ČSN ISO 9096 („Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí“). Tato metoda je vyvinuta pro měření v oboru koncentrací tuhých látek od $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ do $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.

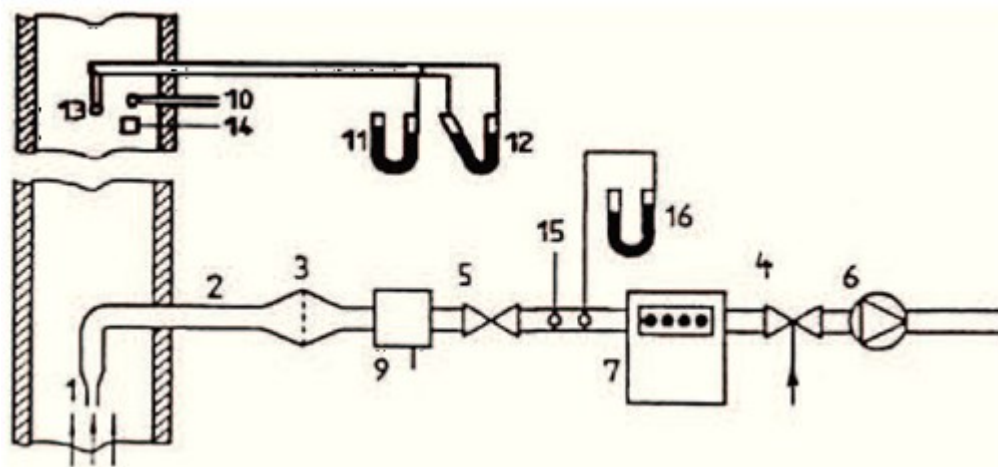
Pro obor koncentrací $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ je vyvinuta metoda popsaná v technické normě ČSN EN 13284-1 („Stacionární zdroje emisí“). Tato metoda je vyvinuta se zvláštním důrazem na měření koncentrací okolo $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. [12]

3.1 Charakteristika gravimetrických metod

Všechny gravimetrické metody spoléhají na konečné stanovení hmotnosti jako prostředek kvantifikace. Vzhledem k tomu, hmotnost může být měřena s větší přesností než většina jiných základní vlastností. Gravimetrické metody jsou potenciálně jedny z nejpřesnějších dostupných analytických metod. Tyto metody patří mezi nejstarší analytické techniky a mohou být zdoluhavé a únavné. V důsledku toho se jen velmi málo gravimetrické metody v současné době používají v environmentální analýze.

Existují tři základní typy analýzy gravimetrické metody: fyzikální gravimetrie, termogravimetrie a galvanické analýzy. Ty se liší v přípravě vzorku před vážením vzorku. Fyzická gravimetrie je nejběžnější typ používaný v technice prostředí. Jedná se o fyzické oddělení a klasifikace látek ve vzorcích z životního prostředí na základě volatility a velikosti částic (např. celkové nerozpuštěné látky). V termogravimetrii jsou vzorky vytápěny a změny hmotnosti jsou zaznamenány. Těkavé pevné látky analýzy jsou důležitým příkladem tohoto typu gravimetrickou metodu. Galvanické analýzy zahrnují elektrochemickou redukci kovových iontů na katody a současně uložení iontů na katodě. [11]

Pro měření tuhých znečišťujících látek se používá měřicí aparatura, viz Obr. 3. 1. Tato aparatura je starší, ale doposud se ve velké míře používá.



Obr. 3. 1 – Sestava měřicí aparatury [5]

- 1 - Hubice sondy
- 2 - Spojovací potrubí
- 3 - Sestava filtru
- 4 - Regul. množství přisátého vzduchu
- 5 - Ventil
- 6 - Odsávací čerpadlo
- 7 - Objemový průtokoměr
- 9 - Odlučovač vlhkosti
- 10 - Měření teploty
- 11 - Měř. statického tlaku
- 12 - Měř. dynamického tlaku
- 13 - Rychlostní sonda
- 14 - Měření vlhkosti
- 15 - Měření teploty
- 16 - Měř. statického tlaku

Pro správné a přesné měření tuhých znečišťujících látek je nutné správně nastavit počet vzorkovacích bodů. V Tab 3. 1 a Tab 3. 2 je upřesněn počet vzorkovacích bodů pro kruhové a čtyřhranné potrubí.

Tab 3. 1 – Minimální počet vzorkovacích bodů v potrubí kruhového průřezu [12]

Plocha vzorkovacího průřezu	Průměr potrubí	Nejmenší počet vzorkovacích přímk (průměrů)	Nejmenší počet vzorkovacích bodů v rovině
[m ²]	[m]		
<0,1	<0,35	-	1 ^{A)}
0,1 až 1,0	0,35 až 1,1	2	4
1,0 až 2,0	1,1 až 1,6	2	8
>2,0	>1,6	2	Nejméně 12 a 4 na 1m ^{2B)}
A) Použití jediného vzorkovacího bodu může vést ke vzniku chyby přesahující hodnotu požadovanou normou			
B) Pro velká potrubí zpravidla stačí 20 vzorkovacích bodů			

Tab 3. 2 – Minimální počet vzorkovacích bodů v potrubí čtyřhranného průřezu [12]

Plocha vzorkovacího průřezu	Nejmenší počet vzorkovacích přímk ^{A)}	Nejmenší počet vzorkovacích bodů
[m ²]		
<0,1	-	1 ^{B)}
0,1 až 1,0	2	4
1,0 až 2,0	3	9
>2,0	≥3	Neméně 12 a 4 na 1 m ^{2C)}
A) Odlišné dělení plochy je nutné například v případě, že délka delší strany průřezu je více než dvojnásobkem		
B) Použití jediného vzorkovacího bodu může vést ke vzniku chyby přesahující hodnotu požadovanou normou		
C) Pro velká potrubí zpravidla stačí 20 vzorkovacích bodů		

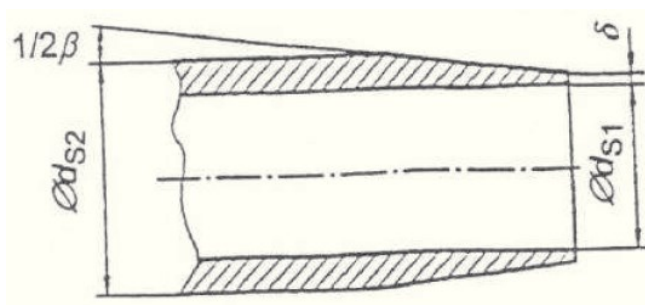
3.2 Typy odběrových sond

Mezi nejjednodušší typy sond patří **jednoduché sondy**. Tyto sondy nejsou opatřeny žádným snímačem pro okamžité a přímé sledování proudu plynu.

Sondy pro okamžité sledování proudu plynu se dělí na izokinetické a nulové. **Izokinetické sondy** musí mít kalibrovaný rozdíl tlaku pro požadovaný způsob odebírání vzorku. **Nulové sondy** musí mít stejné statické tlaky na výstupech pro požadovaný způsob odebírání vzorku.

Speciální sondy mohou pracovat na všech uvedených způsobech. Zvláštní případ speciální sondy je sonda chlazené, které jsou jednoduché sondy chlazené vzduchem nebo vodou. Jsou schopny odběru při teplotě do 600 °C. [12]

Na Obr. 3. 2 je zobrazena hubice sondy. U hubice sondy je požadována ostrá hrana, nesmí obsahovat žádné překážky a musí mít jednoduchý tvar. Norma ČSN ISO 9096 udává, že průměr hubice sondy nesmí být menší než 4 mm. Rychlosti v hubici dosahují $5 - 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, proto se průměr hubice určí v závislosti na rychlosti.



Obr. 3. 2 – Tvar hubice sondy [5]

3.3 Zahájení, průběh a ukončení odběru vzorku

Zahájení odběru se provede otočením sondy do polohy směru proudu vzduchu a částic. Dále je nutné zapnout zdroj sání, úplné otevření vstupního kohoutku odběrového čerpadla. Poté je regulační kohoutek postupně uzavírán, dokud není dosaženo požadované rychlosti odběru vzorku. Toto nastavení je nutné provést co nejrychleji, z důvodu ovlivnění vzorku neizokinetickými podmínkami. Za izokinetický odběr se předpokládá, pokud poměr rychlosti proudění v ústí a okolo odběrové sondy v době odběru je od 0,95 až 1,05 resp. 1.15. Schéma sondy a rychlostí je na Obr. 3. 3., a rovnice popisující poměr rychlostí je zobrazena níže (3.1). Mohou nastat tři možnosti:

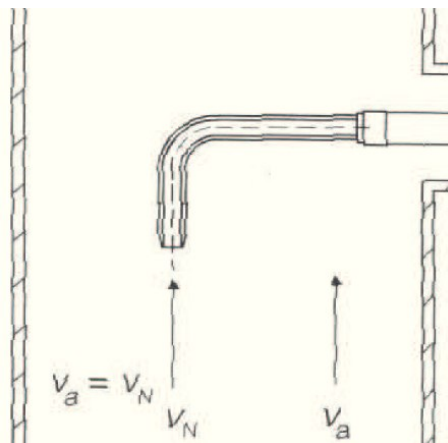
- ω_i se rovná jedné, jedná se o izokinetické proudění,
- ω_i je menší než jedna, jedná se o podsátí,
- ω_i je větší než jedna, jedná se o přesátí. [12]

v_N – rychlost proudění vzduchu v ústí sondy

v_a – rychlost proudění vzduchu v potrubí

Výpočet kinetického poměru:

$$\omega_i = \frac{v_N}{v_a} = 1 \rightarrow \text{dodržení izokinetického poměru} \quad (3.1)$$



Obr. 3. 3 – Zobrazení izokinetické rychlostí na prašné trati [5]

Řízení je závislé na vybavení zařízení. Jsou dva druhy regulace a to bez kombinované sondy a s kombinovanou sondou. Pokud se použije verze bez kombinované sondy, musí se izokinetický poměr odlaďovat ručně pomocí snímání hodnot do PC. Pro tento postup je použita řídicí aparatura IZO. S použitím kombinované sondy toto odpadá. O vyrovnání rychlostí se stará měřící ústředna IZOMAT. Sondu je zapotřebí chladit, a to vodou o teplotě na hranici bodu varu.

Ukončení odběru se provádí otočením sondy do polohy ústí odběrové hubice ve směru proudění plynu, uzavření vstupního kohoutu odběrového čerpadla, otevřením kohoutu regulace a vypnutím zdroje sání. [12]

3.4 Experimentální stanovení koncentrace prachu na prašné trati

Experimentální zařízení prašné trati se nachází ve Výzkumném energetickém centru VŠB – TU Ostrava. Zařízení slouží k měření koncentrace tuhých znečišťujících látek za různých provozních parametrů. Základní parametry tratě jsou:

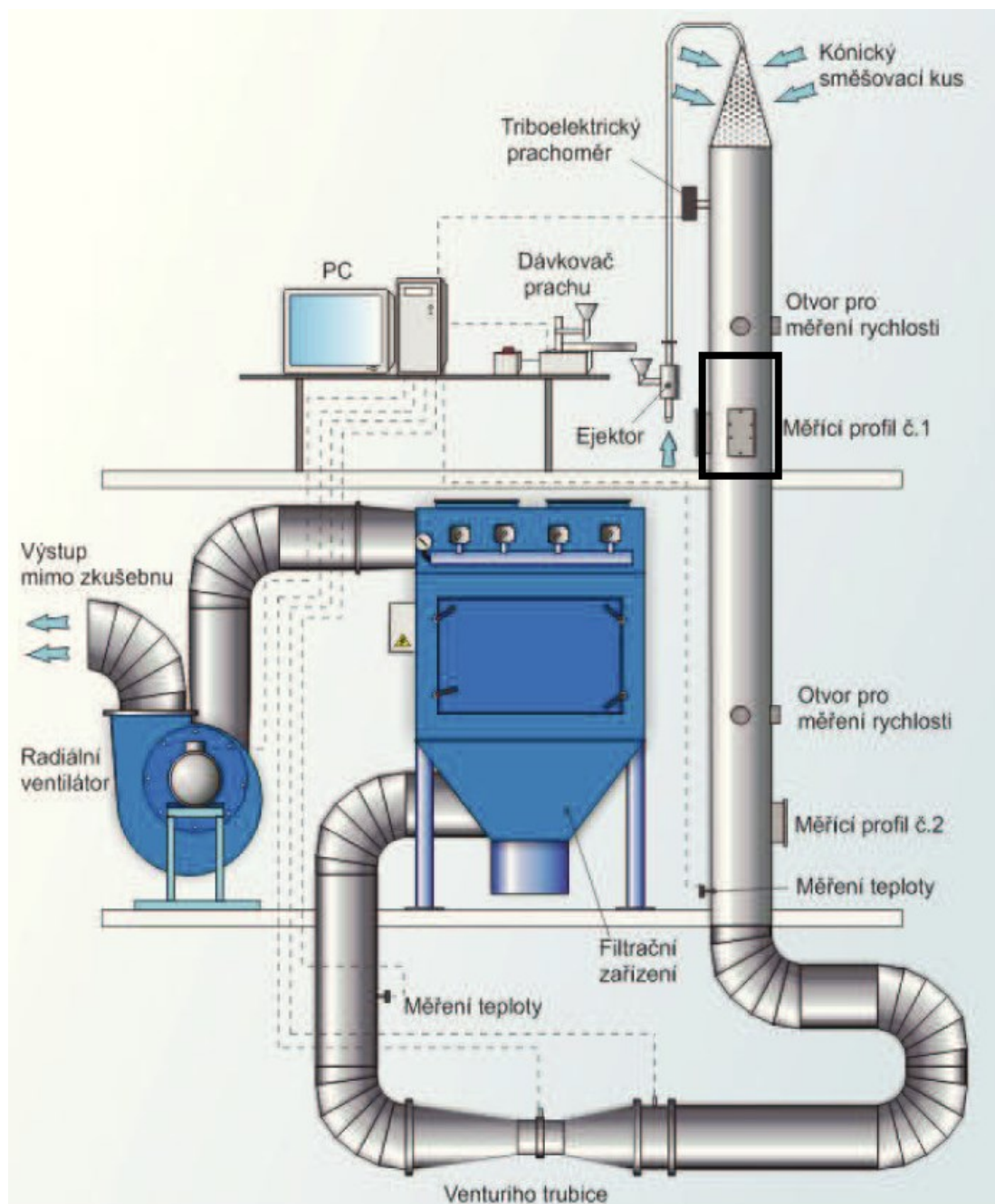
- hmotnostní tok tuhých znečišťujících látek (TZL) ($25 - 2500 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$),
- střední koncentrace TZL v měřících profilech ($5 - 500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}_N$),
- střední rychlost vzdušiny v měřícím profilu ($5 - 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),
- průměr potrubí 313 mm,
- délka potrubí necelých 7 m,
- pracovní médium je stlačený vzduch,
- dvě nezávislé odběrové stanoviště.

Popis funkce zařízení a vyhodnocení experimentálního měření na prašné trati

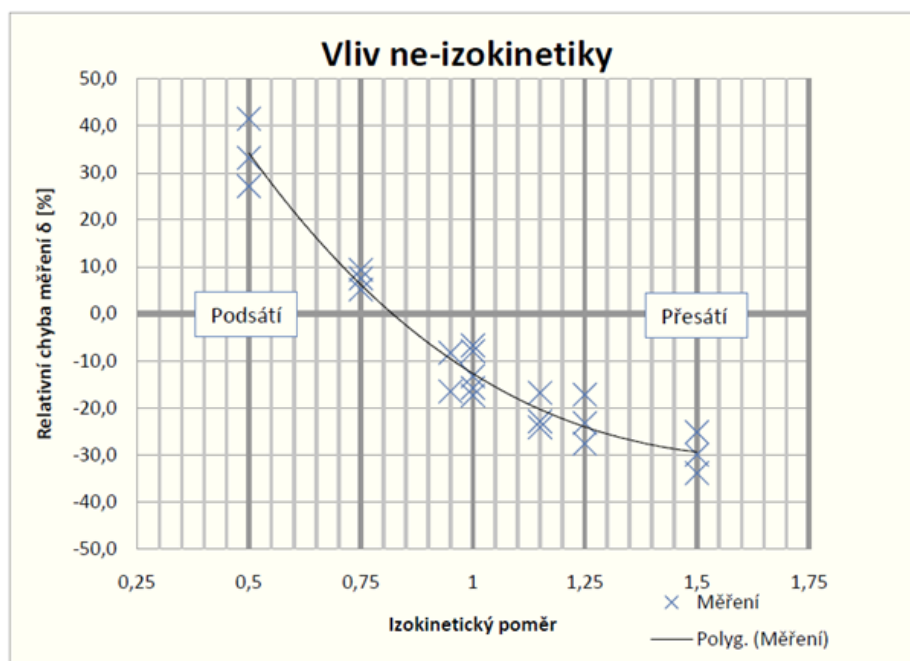
Prach je na prašnou trať dávkován pomocí vibračního dávkovače, do kterého se prach nasype, viz Obr. 3. 4. Prach je odsud nasáván společně se vzduchem, kdy vznikne směs vzduchu a pevných částic. Před odběrovými sondami se nachází otvor pro měření rychlosti, který není v matematickém modelu v proudění na prašné trati zohledněn. Po změření dvěma odběrovými sondami, které jsou řazeny za sebou asi tři metry od sebe (Měřicí profil č. 1, Měřicí profil č. 2, viz Obr. 3.4 směs opouští zařízení a je vypouštěno mimo prostory učebny. Na Obr. 3. 4. je popsáno celé experimentální zařízení se všemi prvky a přístroji. Je zde přehledně popsána celé proudění vzduchu a pevných částic od vstupu až po výstup z prašné trati. [5]

Na Obr. 3. 4 je vyznačena část prašné trati, která byla využita pro matematické modelování proudění vzduchu a prachových částic. Výpočtový model pro matematické modelování proudění na prašné trati byl proveden pro délku 1,15 m a průměru 313 mm. Rozměry odběrové sondy jsou uvedeny na Obr. 5. 2. a Obr. 5. 3.

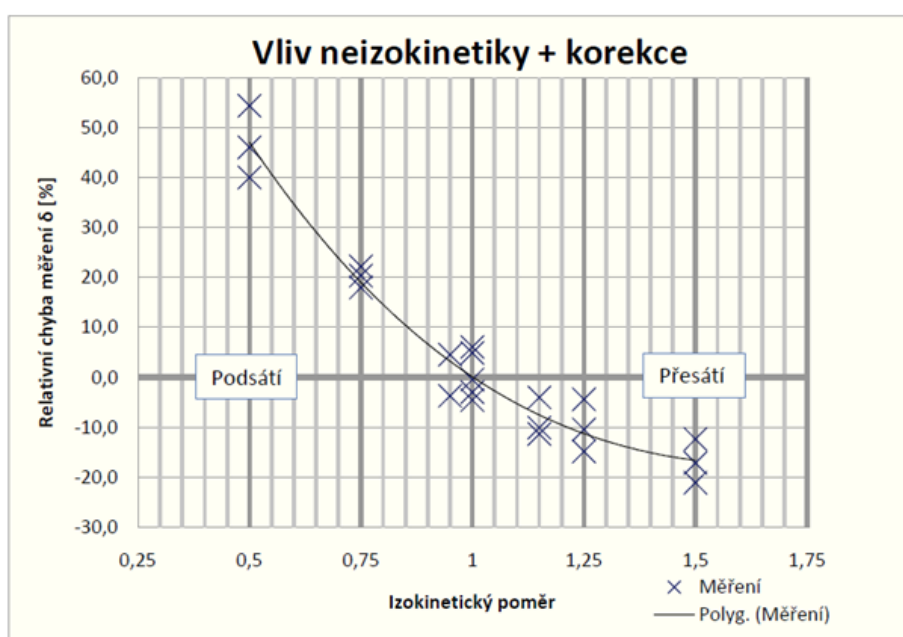
Podsátí a přesátí definujeme na výstupu z odběrové sondy. Změna tlaku je závislá na změně kinetického poměru. Při přesátí se kinetický poměr zvyšuje. Naopak při podsátí se kinetický poměr zmenšuje. Na Obr. 3. 5 a Obr. 3. 6 jsou zobrazeny výsledky z experimentálního měření. Toto praktické měření bylo provedeno pro prachové částice o nekonstantní velikosti. Z tohoto důvodu se hodnoty při opakovaném měření mírně liší.



Obr. 3. 4– Experimentální zařízení [5]



Obr. 3. 5 – Výsledek měření koncentrace na prašné trati 1 [5]



Obr. 3. 6 - Výsledek měření koncentrace na prašné trati 2 [5]

3.5 Definování vstupních parametrů pro matematické modelování

Následující vstupní hodnoty byly pro matematické modelování stanoveny z experimentálního zařízení prašné trati z Výzkumného energetického centra na VŠB – Technické univerzity Ostrava.

Zadané hodnoty:

$$Q_v = 3000 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1} \text{ (objemový průtok vzduchu)}$$

$$d = 0,313 \text{ m}$$

$$l = 1,15 \text{ m}$$

$$\vartheta = 1,56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Kinematická viskozita byla vypočtena jako průměr mezi kinematickou viskozitou vzduchu při 0°C a při 50°C (Tab 3. 3). Ve výzkumném energetickém centru na VŠB – Technické univerzity Ostrava při měření koncentrace na prašné trati byla teplota 24°C.

Tab 3. 3 – Tabulka viskozity vzduchu [23]

Teplota [°C]	Dynamická viskozita [Pa·s ⁻¹]	Kinematická viskozita [m ² ·s ⁻¹]
0	1,71·10 ⁻⁵	1,33·10 ⁻⁵
50	1,95·10 ⁻⁵	1,79·10 ⁻⁵
100	2,17·10 ⁻⁵	2,30·10 ⁻⁵

Přepočet vstupních hodnot

Tab 3. 4 – Tabulka zadaných hodnot z Výzkumného energetického centra VŠB – TUO

Průměr d [m]	$Q_{v,skut}$ [m ³ ·hod ⁻¹]	Q_m [kg·s ⁻¹]	ρ [kg·m ⁻³]	ϑ [m ² ·s ⁻¹]
0,313	3000	1,075	1,29	0,0000156

- hmotnostní průtok vzduchu

$$Q_m = \rho \cdot \frac{Q_v}{3600} = 1,29 \cdot \frac{3000}{3600} = 1,075 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.2)$$

- Reynoldsovo číslo na vstupu do prašné trati

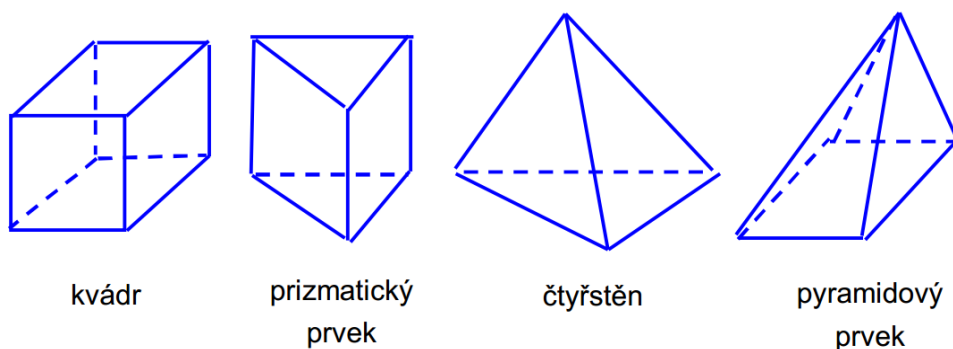
$$Re = \frac{v \cdot d}{\vartheta} = \frac{11,404962 \cdot 0,313}{1,56 \cdot 10^{-5}} = 228\,830,33 \quad (3.3)$$

4. Matematické modelování proudění

V současnosti je stále populárnější využívat numerických metod k modelování různých fyzikálních dějů. Matematické modelování lze použít při navrhování tvarů a konstrukcí nejen v hydromechanice, ale i v dalších odvětvích strojírenského průmyslu. Matematický model je vhodný pro porovnání se skutečnými hodnotami z měření. [1]

4.1 Metoda konečných objemů

U metody konečných objemů je systém vytvořen z malých nepřekrývajících kontrolních objemů o různých tvarech. Podle tvaru buněk se síť rozděluje na strukturovanou a nestrukturovanou. Strukturovaná síť je vytvořena z elementů o tvaru obdélníku nebo křivočarého čtyřúhelníku v modelování ve 2D. 3D model se tedy skládá z kvádrů a obecných šestistěnů. Požadavkem této sítě je, že hranice jednotlivých elementů musí sousedit pouze s jedinou hranicí sousedního elementu. Nestrukturovaná síť využívá k tvorbě sítě i jiné tvary elementů. Jedná se například o tvar čtyřstěn nebo pyramidový prvek. Možnosti jednotlivých tvarů buněk jsou uvedeny na Obr. 4. 1. [1]



Obr. 4. 1– Jednotlivé tvary elementů [1]

Metoda konečných objemů využívá integrálního tvaru rovnic a aproximace toků přes hranice kontrolního objemu. Základní rovnice jsou rovnice kontinuity, zachování hybnosti, transportní aj.

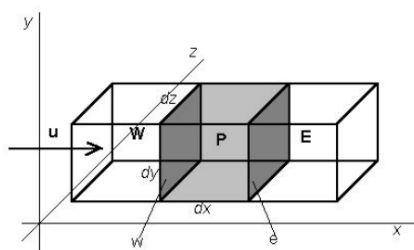
Definice rovnice kontinuity:

- konstantní hustota, ustálený stav, jednosměrný tok ve směru x

$$\frac{\partial}{\partial x}(u) = 0 \quad (4.1)$$

Rovnice zachování hybnosti:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial u}{\partial x} \right] \quad (4.2)$$



Obr. 4. 2 – Souřadnicové schéma [1]

Integrací těchto dvou rovnic přes konečné objemy se převedou výchozí diferenciální rovnice na objemový integrál. Při použití divergenčního teorému na plošný a diskretizací na výsledný algebraický tvar následujícím způsobem:

$$\int_V \frac{\partial u}{\partial x} dV = \int_V \frac{\partial u}{\partial x} dx dy dz = \int_A (u) dA = (uA)_e - (uA)_w \quad (4.3)$$

Integrace rovnice kontinuity vede na tvar

$$(uA)_e - (uA)_w = 0 \quad (4.4)$$

Fyzikálně výrazy na levé straně označují rozdíl objemových průtoků

$$Q_e - Q_w = 0[1] \quad (4.5)$$

Při pohybu vzduchu nebo tekutin mohou nastat různé fyzikální děje, které jsou dány skutečným modelem a jeho fyzikálními vlastnostmi:

- laminární nebo turbulentní proudění,
- stlačitelné nebo nestlačitelné proudění,
- stacionární, nestacionární a přechodové proudění,
- izotermické nebo neizotermické proudění,
- jednofázové nebo vícefázové proudění,
- hoření, hašení a jiné chemické reakce,
- proudění porézním prostředím, aj.

Pro řešení modelování proudění pomocí numerických metod, jsou k dispozici různé programy založené na metodě konečných objemů:

- AnsysFluent,
- Ansys – Flotran,
- Star – 3D,
- Ansys – CFX,
- Flow 3D,
- Rampant,
- Fluidyn – Panache. [13]

Na učebnách v prostorech VŠB – Technické univerzity Ostrava je k dispozici programový software AnsysFluent a Ansys – CFX, které jsou integrovány do prostředí Workbench. Základním krokem matematického modelování je vytvoření geometrie.

Geometrii lze vytvořit jako 2D nebo 3D model. V programovém softwaru Ansys pro vymodelování geometrie slouží program DesingModeler. Další programy, kterými lze vytvořit geometrii jsou například AutoCad, Inventor, Catia, Pro Engineer a další. Z těchto programů lze následně geometrii vyexportovat do programu DesingModeler.

Další fází je vytvoření výpočetní sítě. V Ansysu lze vytvořit síť v programu AnsysMeshing. Výpočetní síť musíme navrhnout tak, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. To záleží například i na tvaru buněk. Při síťování je důležité se zaměřit na místa, kde jsou požadovány nej přesnější vyhodnocení. To se dosáhne např. zhuštěním výpočetní sítě. Důležitý je celkový počet buněk v geometrii. Celkový počet buněk v geometrii zásadně ovlivňuje dobu numerického výpočtu. Vytvoření sítě je časově náročná operace při tvorbě matematického modelu a uživatel musí zohlednit své zkušenosti z proudění tekutin a výpočtových programů. V kroku tvorby výpočetní sítě je nutné pojmenovat všechny stěny, viz Obr. 5. 9.

Po dokončení výpočetní sítě je nutné vyexportovat geometrii a výpočetní síť do programu Ansys Fluent. Ansys Fluent patří k velice rozšířeným programům pro numerické řešení úloh a jejich následným zobrazením výsledků. Po otevření programu Ansys Fluent a úspěšném načtení geometrie a výpočetní sítě, je nutné nastavit výpočtový matematický model, gravitační zrychlení, materiály a okrajové podmínky. Ve složitějších případech výpočtu se mohou nastavovat další funkce, jako například přidáním další fáze do výpočtu. Po nastavení všech hodnot potřebných k výpočtu provedeme pro celý model inicializaci proudového pole, zadáme maximální počet iterací a spustíme výpočet. Po dokončení výpočtu si lze zobrazit jednotlivé veličiny (tlak, rychlost, teplota, koncentrace, aj.). Dále lze zobrazit výsledek jako vyplněné kontury, vektorové pole, trajektorie částic, vyhodnocení pomocí grafu a jiné. Vhodné je srovnat výsledky se skutečným měřením.[13]

4.2 Více fázové modely

Jedná se o aplikaci modelu se dvěma nebo více fázemi (plyn, kapalina, pevná látka). Jedná se například o tyto aplikace: kavitace, vlnění vodní hladiny, separace, promíchávání, hydraulická doprava, pneumatická doprava, spalování, odpařování, hašení aj. [1]

V tomto případě je určen vícefázový model jako:

plyn – pevná látka

- proudění pevných částic v plynu

V současné době jsou dva přístupy řešení vícefázového proudění:

- Euler – Lagrangeův přístup,
- Euler – Eulerův přístup.

Tato práce byla počítána pomocí Euler – Lagrangeova přístupu.

4.3 Euler – Lagrangeův přístup

„Při Euler – Lagrangeově přístupu je tekutá fáze uvažována jako kontinuum a je řešena Navierovými – Stokesovými rovnicemi, zatímco dispergovaná fáze (částice) je řešena stopováním velkého počtu částic, bublin nebo kapek v proudovém poli. Tato dispergovaná fáze může vyměňovat moment, hmotu a energii se spojitou fází. Základním předpokladem je, že v tomto modelu dispergovaná fáze zaujímá malý objemový zlomek, ačkoliv pro hmotnost, resp. hmotnostní průtok to nemusí platit ($Q_{m,částic} \leq Q_{m,tekutiny}$). Trajektorie (dráhy) částic nebo kapek jsou počítány individuálně v předdefinovaných intervalech během výpočtu spojitě fáze. Toto umožňuje modelovat proudění částic ve sprejích, sušičkách, spalování uhelných a kapalných paliv a částicemi ovlivněné proudění. Je nevhodný pro modelování směsi kapalina – kapalina, fluidizačního lože a dalších aplikací, kde objemový zlomek druhé fáze není zanedbatelný.“ [1]

4.4 Trajektorie pevných částic v plynu

Jedná se o vícefázové proudění, při kterém jsou pevné částice unášeny proudem vzduchu v Euler – Lagrangeově pojetí. Částice lze definovat o konstantním průměru nebo lineární změně průměru. V této diplomové práci jsou uvažovány částice o konstantní velikosti. Je možno řešit následující varianty:

- výpočet trajektorie diskrétní fáze užitím Lagrangeovy formulace, přitom se zahrnuje diskrétní fáze pevných částic, hydrodynamický odpor a gravitační síly pro stacionární i nestacionární případ,
- vliv turbulentních vírů na rozložení částic,
- ohřívání a ochlazování částic,
- hoření částic,
- vznik kapek. [1]

Při modelování se sleduje pouze malý počet částic. Tento malý počet částic se pohybuje ve spojitě fázi. Částice se sleduje po celou dobu jejího pohybu v modelu. To je místo vstupu a výstupu. Pohyb těchto částic je ovlivňován různými hydrodynamickými odpory a gravitačním zrychlením. Pohyb částic je definován rovnicemi pro pohyb, rychlost a hmotnost částic. [1]

Rovnice pohybu částic

Rovnováha sil při použití Langrangeova přístupu:

$$\frac{du_P}{dt} = F_D(u - u_P) + \frac{\rho_X}{\rho_P}(\rho_P - \rho) + F_X \quad (4.6)$$

kde: F_X je vnější objemová síla [N]

$F_D(u - u_P)$ je síla hydrodynamického odporu vztažená na jednotku hmotnostní částice [N]

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_P D_P^2} \frac{C_D Re}{24} \text{ [N]} \quad (4.7)$$

u – rychlost kapaliny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

u_P – rychlost částic, řešená integrací podle času [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

μ – molekulární viskozita kapaliny [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

ρ – hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

ρ_P – hustota částic [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

D_P – průměr částic [m]

Re – Reynoldsovo číslo [-]

$$Re = \frac{\rho D_P |u_P - u|}{\mu} \quad (4.8)$$

C_D – koeficient hydrodynamického odporu

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (4.9)$$

kde $a_{1,2,3}$ jsou konstanty pro určitý rozsah Re , definované Morsim a Alexandtem. [1]

Pro nekulové tvary částic je dán vztah podle Haidera a Levenspiela.

$$C_D = \frac{24}{Re_{sph}} \left(1 + b_1 Re_{sph}^{b_2} \right) + \frac{b_3 Re_{sph}}{b_4 + Re_{sph}} \quad (4.10)$$

kde:

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581F + 2.4486F^2) \quad (4.11)$$

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565F^2 \quad (4.12)$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944F + 18.4222F^2 - 10.2599F^3) \quad (4.13)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584F - 20.7322F^2 + 15.8855F^3) \quad (4.14)$$

Činitel tvaru je definován v nastavení částic v políčku Shape Factor.

$$F = \frac{s}{S} \quad (4.15)$$

kde s je plocha částice pokud je tvar kulový, S je skutečná plocha částice.

Nastavení okrajových podmínek při dotyku částic se stěnou

Jedná se o nastavení, jak se bude částice chovat při styku se stěnou. Existuje celá řada variant, například:

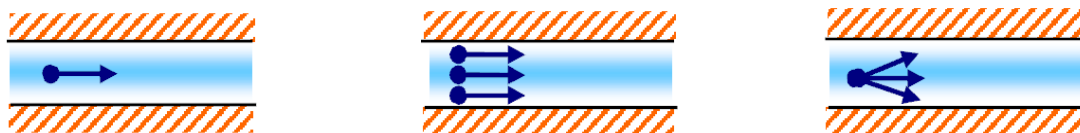
- reflected – částice se odrazí od stěny,
- escape – částice při dotyku se stěnou opouští výpočetní oblast a už se v modelu nevyskytuje,
- trapped – částice se na stěně přichytí,
- slide – částice se po dotyku se stěnou sklouzne o její povrch.

Nadefinování částic na vstupu

Jedná se o nadefinování částic při vstupu do výpočetní oblasti. Existuje několik způsobů nastavení, jsou to například:

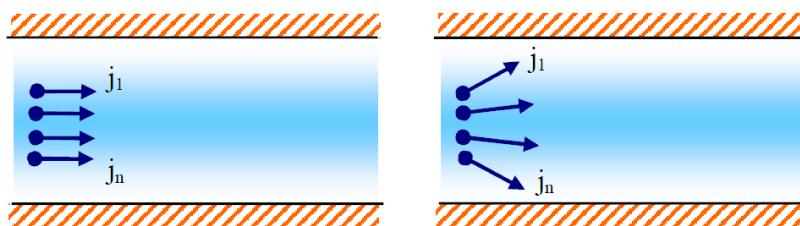
- o konstantní velikosti nebo měnící se velikosti,
- vycházející z jednoho bodu, popřípadě varianta spray,
- vycházející po definované ploše,
- definování každé částice zvlášť (single),
- definování skupiny částic (group).

Grafické zobrazení nadefinování částic na vstupu jsou zobrazeny na Obr. 4. 3.



Obr. 4. 3 – Možnosti nadefinování částic na vstupu [1]

Pro definování částic jako varianta group zdroj jsou dvě varianty:



Obr. 4. 4 – Varianty group zdroje pro směr vodorovný, podobně je zdroj uspořádaný pro směr svislý [1]

4.5 Definování matematického modelu proudění plynné směsi s prachovými částicemi na prašné trati

Výsledný matematický model proudění plynné směsi a prachovými částicemi na prašné trati zahrnuje rovnici kontinuity, Navier – Stokesovy rovnice a pohybovou rovnici částic v Lagrangeově přístupu.

Proces je charakterizován jako ustálené proudění plynné fáze a prachových částic o konstantním průtoku a konstantní velikosti částic. Prouděním vzduchu a prachových částic na prašné trati je spojeno s řešením problému definovaném jako:

- turbulentní proudění,
- konstantní rozměr částic,
- nestlačitelné proudění,
- izotermní proudění,
- proudění dvoufázové: vzduch – částice, pomocí Euler – Lagrangeova přístupu.

Celý matematický model je počítán jako 2D osově symetrický. Byly provedeny tři varianty numerického výpočtu pomocí matematického modelu proudění na prašné trati:

1. První fáze spočívá v proudění samotného vzduchu s nulovými přetlaky na výstupech. Při tomto nastavení byly spočítány všechny typy matematických modelů ($K - \varepsilon$, $K - \omega$) a vyhodnoceny proudové veličiny jako tlaky a rychlosti. Pro další výpočty byl vybrán model $K - \varepsilon$ RNG.
2. Druhá fáze spočívala v dosažení izokinetického poměru v rychlosti (v ústí a okolo odběrové sondy) viz kapitola 3. 3.
3. V poslední fázi se jednalo o nadefinování proudění částic v matematickém modelu. Numerický výpočet byl proveden pro velikosti částic 10 μm , 50 μm a 100 μm . Po spočítání všech velikostí s požadovanou přesností byla vytvořena tabulka a graf viz kapitola 7. 4. Z výsledků lze poznat, jak se jednotlivé částice chovají při různých tlacích na výstupu ze sondy. [13]

5. Tvorba geometrie a výpočetní sítě

Výpočetní oblast s rozměry jsou uvedeny na Obr. 5. 1. Průměr je totožný se skutečnými rozměry na prašné trati, to je $\varnothing 313 \text{ mm}$. Jediný rozdíl je v délce, kdy délka prašné trati je necelých 7 m, ale pro matematické modelování činí 1,15 m. Výpočtový

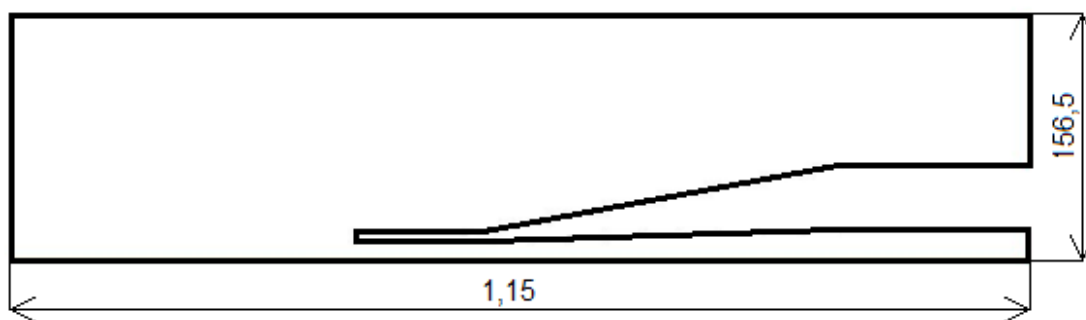
model proudění na prašné trati je zkrácen z důvodů rychlejšího numerického výpočtu. Pozice vymodelované geometrie je znázorněna na Obr. 3. 4.

5.1 Postup přípravy geometrie a výpočetní sítě prašné trati

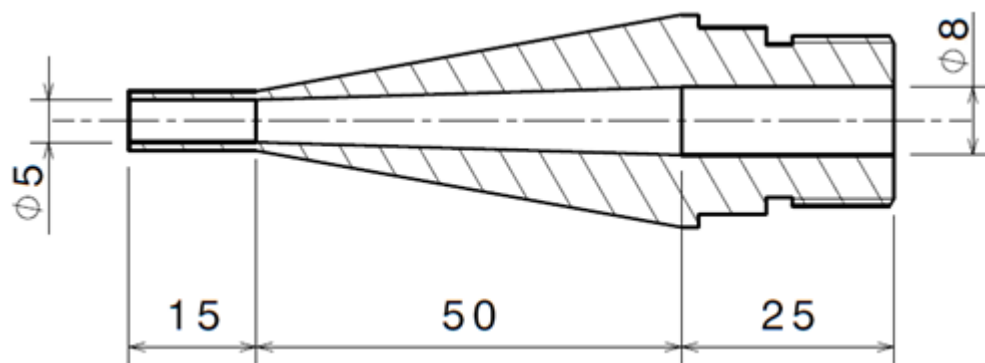
Pro vytvoření geometrie výpočetní oblasti v prašné trati byl použit program DesignModeler, který je součástí programového softwaru Workbench. V tomto programovém softwaru pomocí programu AnsysMeshing lze vytvořit výpočetní síť. Po vytvoření geometrie a výpočetní sítě program Workbench vyexportuje data do programu Ansys Fluent 14.0, ve kterém lze nadefinovat matematický model, fyzikální vlastnosti, okrajové podmínky.

5.2 Tvorba geometrie výpočetní oblasti v programu DesignModeler

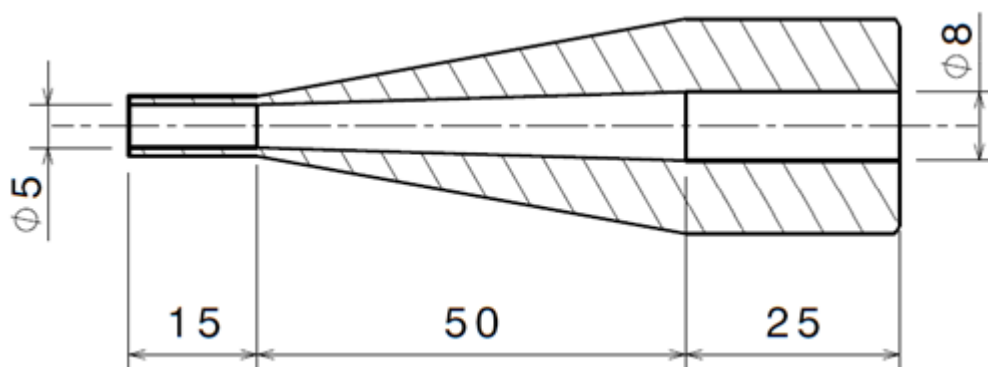
Výpočetní oblast byla vytvořena pouze v oblasti proudění vzduchu. Potrubí je v programu zobrazeno vodorovně, ale v reálu se nachází ve svislé poloze. Gravitační zrychlení je proto nadefinováno od vstupu k výstupu z prašné trati. Jelikož se jedná o rotačně symetrický tvar, úloha je realizována jako 2D osově symetrická. Geometrie dané úlohy je zobrazena na Obr. 5. 1. Umístění geometrie je vyznačeno na Obr. 3. 4. Výkres sondy je zobrazen na Obr. 5. 2. Pro matematický model nebyly vykresleny všechny detaily, protože nebylo důležité se jimi zabývat. Odběrová sonda, která odpovídá výpočtovému modelu pro stanovení koncentrace pevných částic na prašné trati je zobrazena na Obr. 5. 3.



Obr. 5. 1 – Geometrie modelu prašné trati



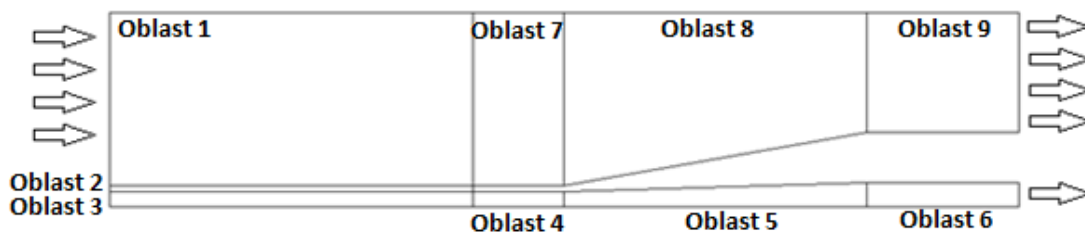
Obr. 5. 2 - Odběrová sonda



Obr. 5. 3 - Sonda použita pro výpočet v matematickém modelu

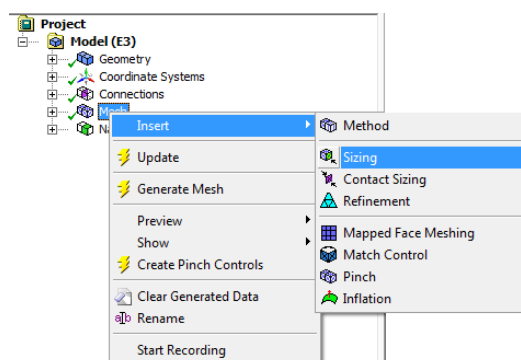
5.3 Tvorba výpočetní sítě ve výpočetní oblasti

Výpočetní síť byla vygenerována v programu AnsysMeshing. Důraz byl kladen na místo u odběrové sondy. Z tohoto důvodu byla síť v této oblasti zhuštěna s ohledem na numerickou simulaci. Dále jsou zde pojmenovány okrajové podmínky pro matematický model (vstup, výstup, stěny, osa). Síť byla tvořena pro devět různých obsahů z důvodu nerovnoměrného zhuštění sítě. Všechny vytvořené oblasti jsou zobrazeny na Obr. 5. 4. Z Obr. 5. 4 je patné kde se nachází vstup a výstup prašné trati.



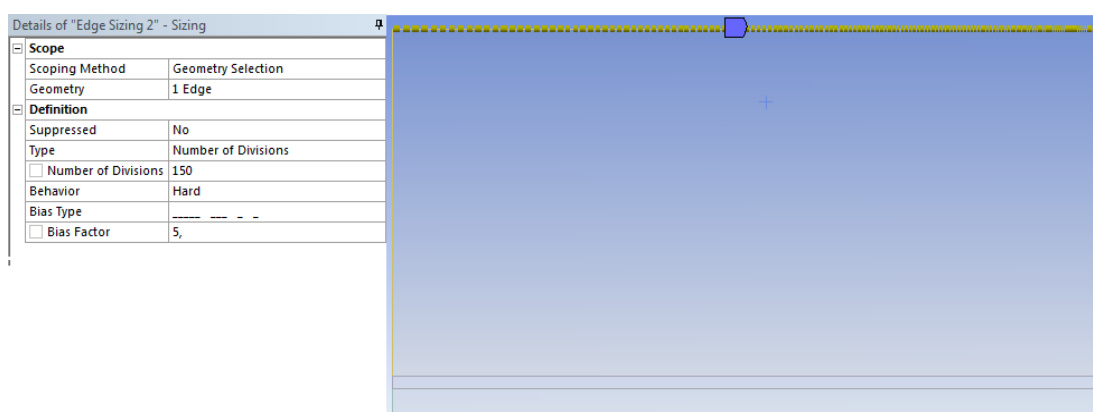
Obr. 5. 4 – Rozdělení geometrie

Sít se nadefinuje pomocí příkazů „Insert→Sizing“, pomocí kterého lze definovat odlišné rozmístění elementů na hranách jednotlivých oblastí.



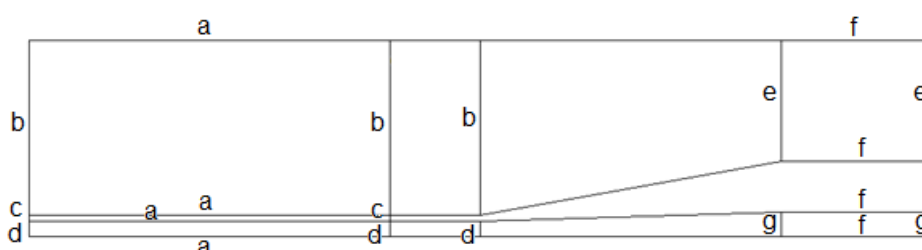
Obr. 5. 5 – Cesta při tvorbě sítě

Vybereme hranu (nebo více hran), na které má být provedeno zhuštění. Hran y o stejné délce musí být nadefinovány naprosto totožnými hodnotami, aby na sebe síť navazovala v různých oblastech viz Obr. 5. 10. Jako typ bylo vybráno „Number of Division“, kde se definuje, na kolik částí má být hrana rozdělena. Jako „Bias Type“ byl vybrán „Hard“ a nadefinovaná hodnota „Bias Factor“. Hodnoty nastavení zhuštění jsou v Tab. 5. Popis jednotlivých hran je na Obr. 5. 7. Zadáání na hraně oblasti 1 si lze prohlédnout na Obr. 5. 6.



Obr. 5. 6 – Zhuštění na stěně

Zde jsou vypsané hodnoty pro zhuštění sítě.



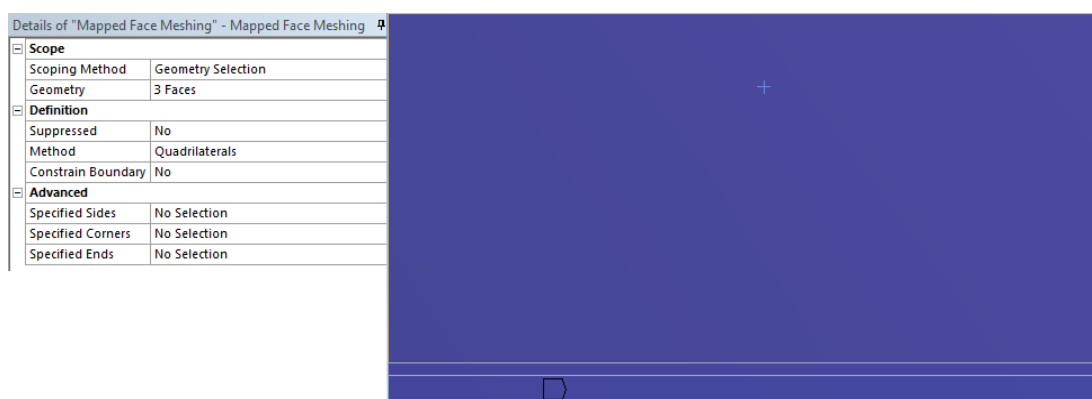
Obr. 5. 7 – Popsání hran pro orientaci

V Tab. 5. 1 jsou popsány všechny nastavení zhuštění na hranách. Definování rozložení zhuštění (Bias Factor) jako „No Bias“ se jedná o rovnoměrné rozložení elementů na hraně.

Tab. 5. 1– Tabulka s hodnotami pro zhuštění elementů na jednotlivých hranách

Hrana	Number of division	Bias Factor
a	150	5
b	90	10
c	8	No Bias
d	20	No Bias
e	70	10
f	60	No Bias
g	23	No Bias

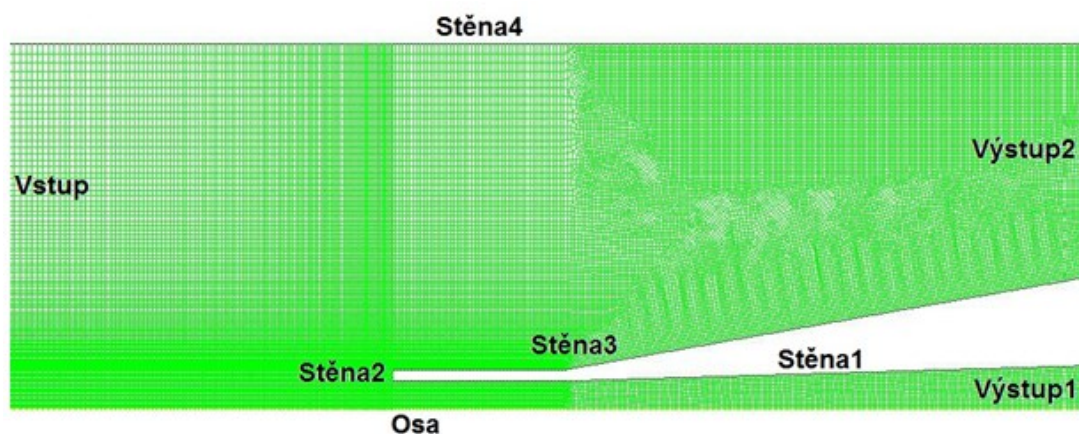
Pro rovnoměrné uspořádání elementů v síti byl použit příkaz „Mapped Face Meshing“. Zde bylo definováno, o jaký tvar elementů se jedná (čtyřhranný nebo tříhranný). Vybereme oblasti, které takto mají být takto definovány. Na Obr. 5. 8 vybrány oblasti 1 – 3.



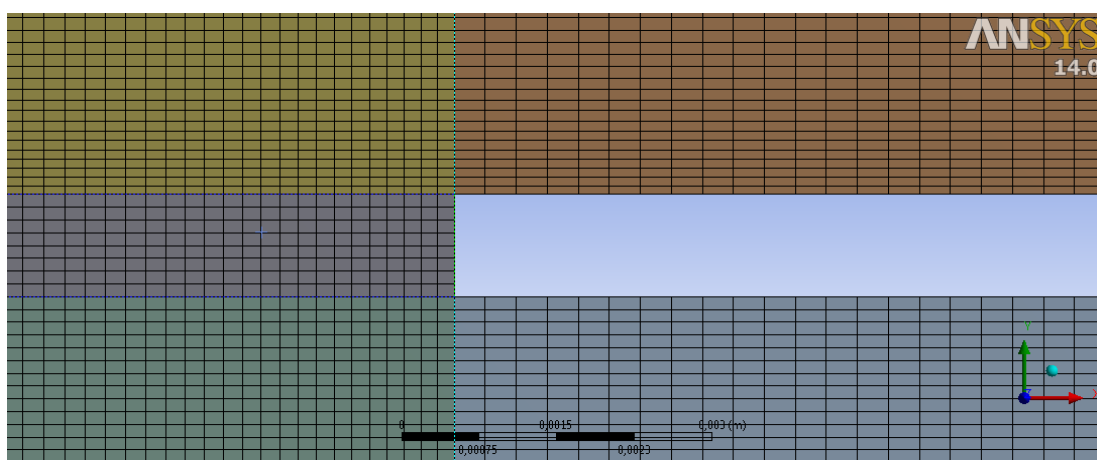
Obr. 5. 8 – Definování vlastností elementů

Následně byla vygenerována výpočetní síť.

Výpočetní síť a popsání okrajových podmínek jsou zobrazeny na Obr. 5. 9. V programu Ansys Meshing je nutné pojmenovat všechny hrany. Z Obr. 5. 9 je patrné, kde se nachází vstup do výpočetní oblasti, stěny, osa a výstupy. Pojmenování hran je nutné pro další nastavení okrajových podmínek v programu Ansys Fluent.



Obr. 5. 9 – Výpočetní síť



Obr. 5. 10 – Síť – detail

6. Aplikace definovaného matematického modelu na prašnou trať

Aplikace matematického modelu proudění na prašné trati byla provedena pro 3 varianty popsané v kapitole 4.5. První varianta se týkala proudění vzduchu. Zde byla provedena simulace pro všechny turbulentní modely v programu Ansys Fluent ($K - \varepsilon$ a $K - \omega$) při nulových přetlácích na výstupech. Další varianta numerických výpočtů byla zaměřena na dosažení izokinetických podmínek v oblasti odběrové sondy. Třetí varianta numerických výpočtů se týkala vícefázového proudění na prašné trati. Byly nadefinovány částice o různých velikostech ($10 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$).

6.1 Nastavení matematického modelu, okrajových podmínek

V tomto bodě je podrobně popsáno nadefinování matematického modelu v programu Ansys Fluent 14.0.

General

Zde je definováno tíhové zrychlení. Je zadáno s ohledem na polohu prašné trati. Jelikož je prašná trať osově symetrická, byl vytvořen matematický model jako 2D model osově symetrický. V záložce „general“ je toho nutné nadefinovat.

Models

Zde je definováno, o jaké proudění se jedná (laminární nebo turbulentní). O jaké proudění se jedná, určuje Reynoldsovo číslo. Výpočet Reynoldsova čísla je uveden v rovnici 3. 3. Pro turbulentní proudění lze definovat pět modelů numerických výpočtů. Jedná se o modely K- ϵ Standard, K- ϵ Realizable, K- ϵ RNG, K- ω Standard a K- ω SST. V nabídce „models“ se definují i pevné částice. Nadefinování pevných částic je popsáno v kapitole 7. 3.

Materials

Proudícím médiem je definován vzduch o hustotě $1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a o kinematické viskozitě $15,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Boundary Conditions

Zde je nutné správně nadefinovat, kde se nachází vstup, výstup, stěna a osa, aby program správně pracoval, a aby byly dosaženy správné výsledky.

Vstup je definován jako „mass-flow-inlet“ a zadává se zde průtok. Průtok je zde zadáván jako hmotnostní průtok. Výpočet hmotnostního průtoku je uveden v kapitole 3. 5. Nadefinované vstupní hodnoty jsou v Tab 3. 4. Nastavení vstupu je na Obr. 6. 1. Intenzita turbulence byla nastavena na 1%. Hydraulický průměr má hodnotu 313 mm.

Zone Name
vstup

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS

Reference Frame: Absolute

Mass Flow Specification Method: Mass Flow Rate

Mass Flow Rate (kg/s): 1.075 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Direction Specification Method: Normal to Boundary

Turbulence

Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter

Turbulent Intensity (%): 1 P

Hydraulic Diameter (m): 0.313 P

OK Cancel Help

Obr. 6. 1 – Boundary Conditions – vstup

Výstup je definován jako „pressure-outlet“. Prašná trať obsahuje dva výstupy. Výstup z odběrové sondy a výstup z prašné trati. V první variantě se definují nulové přetlaky na obou výstupech. Ve druhé variantě se definuje změna tlaku na výstupu z odběrové sondy, aby byl dosažen izokinetický poměr. V poslední fázi výpočtů po přidání pevných částic byl přetlak na výstupu z odběrové sondy proměnný a byly zaznamenány rychlosti a koncentrace při podsátí resp. přesátí. Výsledky jsou k dispozici v kapitole 7. 4.

Stěny jsou definovány jako „Wall“. Jelikož se jedná o izotermické proudění, v této sekci se nic nedefinuje.

Osa je definována jako „Axis“.

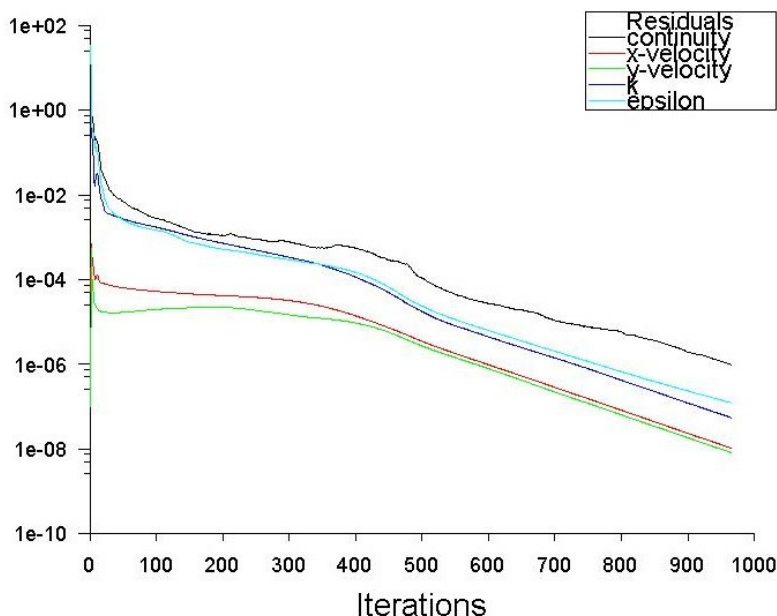
Zbývající položky, které nepatří mezi okrajové podmínky a jsou umístěny ve výpočetní oblasti, byly definovány jako „interior“, aby neovlivňovali proudění na prašné trati.

Solution Initialization

Vždy před začátkem výpočtu se musí provést inicializace výpočetní oblasti podle vstupní okrajové podmínky.

Run Calculation

Zde se nastavuje pouze počet iterací (počet, kdy se výpočet zastaví). Zadaný počet iterací nemusí znamenat konečný počet kroků. Výpočet se automaticky zastaví, pokud iterace konvergovali a dosáhli požadované přesnosti. Výpočet byl spuštěn tlačítkem „Calculate“. Kompletní výsledek proudění je na Obr. 6. 2.

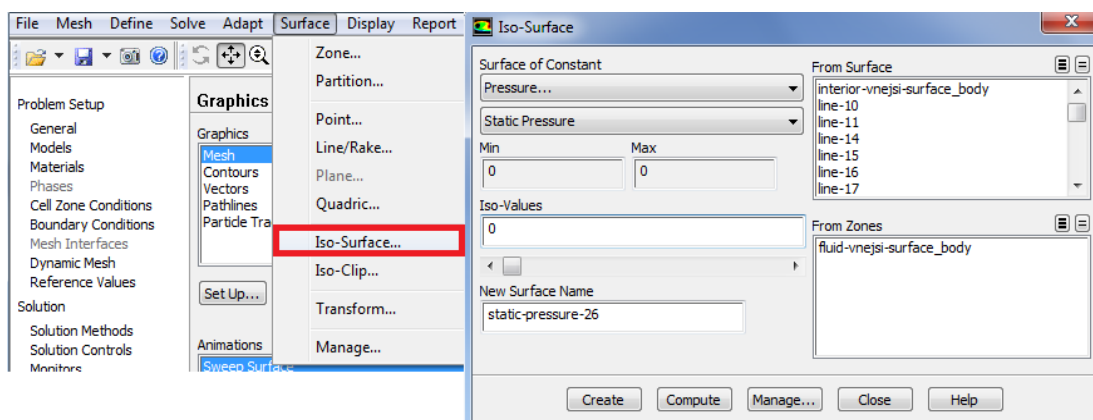


Obr. 6. 2 – Výsledek proudění

7. Vyhodnocení výsledků numerické simulace

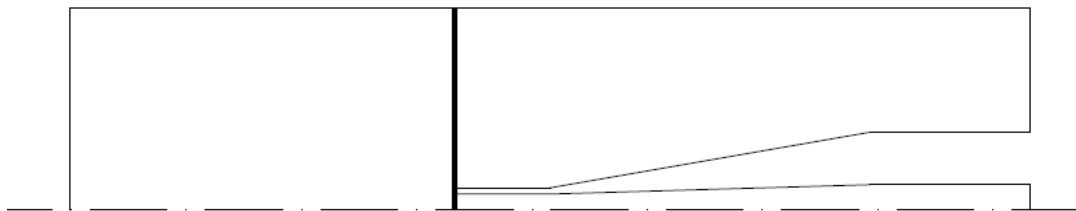
7.1 Vytvoření řezů

Vytvoření řezů k následnému vyhodnocení se provede v záložce „Surface“ v horní liště programu Ansys Fluent, viz Obr. 7. 1.



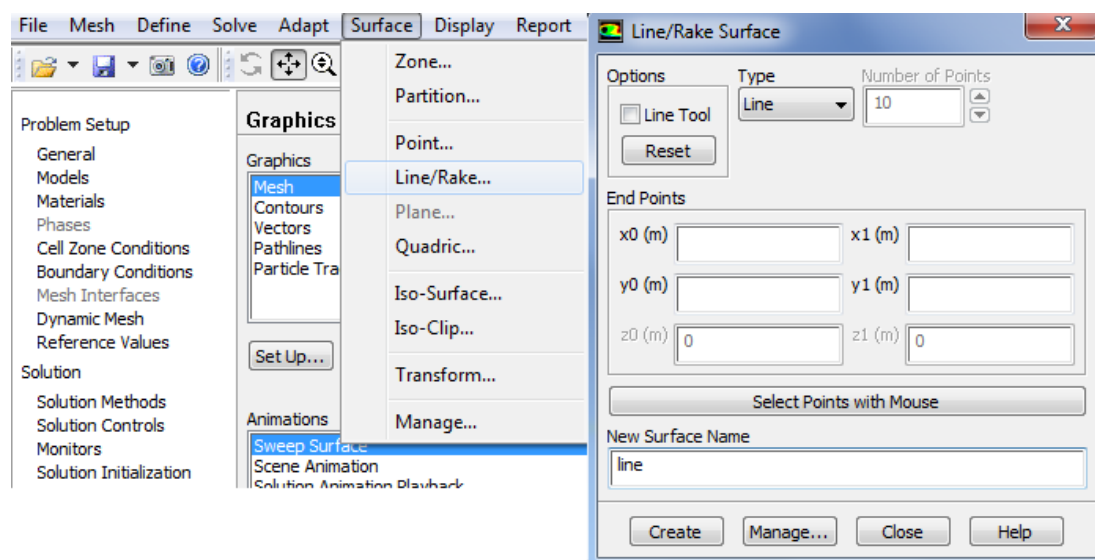
Obr. 7. 1 – Vytvoření řezu Iso-Surface

Řez lze vytvořit celoplošně (Iso-Surface) zadáním pouze vzdálenosti od referenčního bodu a program sám určí koncové hodnoty. Toto provedení je zobrazeno na Obr. 7. 2.



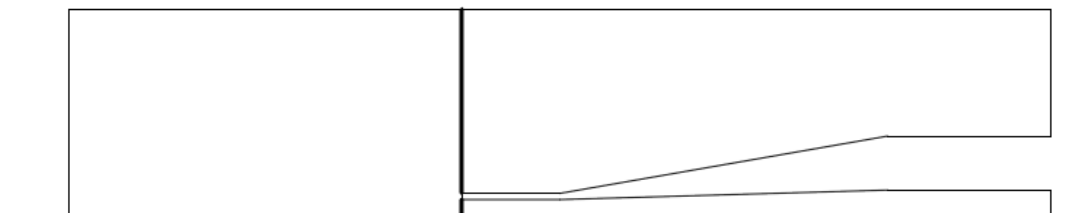
Obr. 7. 2 – Vytvoření řezu celoplošného

Pro výsledek je vhodnější vytvořit řez pomocí Line/Rake viz Obr. 7. 3, což umožňuje vytvoření řezu pouze ve zvolené oblasti. Tímto způsobem při zobrazení grafu nebude prázdné místo, kdy řez procházel stěnou odběrové sondy. Vytvoření řezu pomocí Line/Rake se zadává pomocí počátečního a koncového bodu. Vytvořené řezy si lze prohlédnout na Obr. 7. 4.



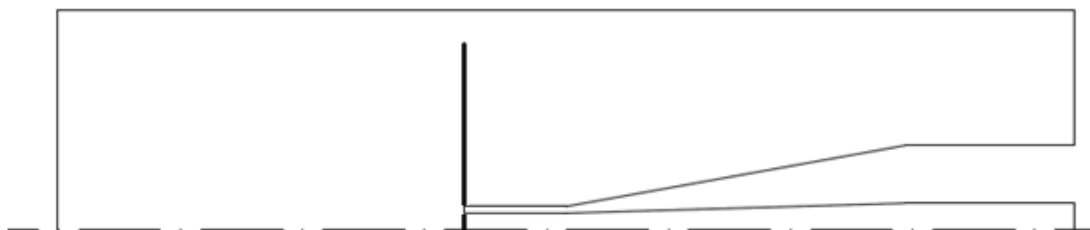
Obr. 7. 3 – Vytvoření řezu Line/Rake

Při tomto řezu se při vyhodnocení vynechá prázdné místo, které by jinak ovlivňovalo výpočet požadovaných hodnot. Například při vyhodnocení průměrné hodnoty by se započítala přes celou hranu sondy nula, což je nežádoucí.



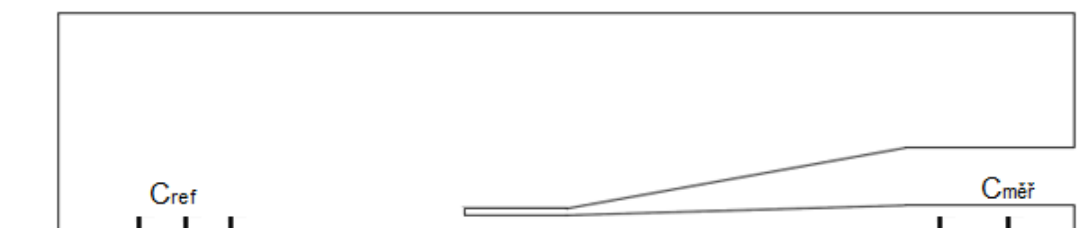
Obr. 7. 4 – Vytvoření řezů rozděleného

Z důvodu velkých rozdílů hodnot u stěn modelu nebyly řezy vytvořeny až ke stěně, ale řez byl ukončen před stěnou. Je to z důvodu, že od vstupu je prашná trať dlouhá a stěna ovlivňuje rychlost až několik desítek centimetrů v proudovém poli. Viz Obr. 7. 5.



Obr. 7. 5 – Vytvoření řezů – zkráceno

Pro odečítání referenční koncentrace byly vytvořeny řezy o délce šířky odběrové sondy. Řezy byly vytvořeny před ústím do sondy tak, aby výsledek nebyl ovlivňován tlakem od odběrové sondy. Další řezy o stejné délce byly vytvořeny v sondě, pro vyhodnocení koncentrace v sondě. Referenční koncentrace c_{ref} je takřka konstantní, proto se odečtené hodnoty zprůměrovaly, a tato hodnota byla použita do tabulky. Tabulku si lze prohlédnout v kapitole 7.4. Měřená koncentrace $c_{měř}$ byla vyhodnocena na výstupu z odběrové sondy. Zbylé řezy vytvořené v odběrové sondě sloužily ke kontrole. Všechny tři hodnoty se změnily až ve čtvrtém řádu, což byla dostačující přesnost. Podíl referenční koncentrace c_{ref} a měřené koncentrace $c_{měř}$ byl vynesena v Graf 7. 4 v závislosti na kinetickém poměru. Zobrazení řezů je zobrazeno na Obr. 7. 6.



Obr. 7. 6 – Vytvořené řezy pro odečítání koncentrace

7.2 Proudění vzduchu bez prachových částic (varianta 1)

Celkem bylo pomocí numerického výpočtu vyhodnoceno 5 variant výpočtů. To odpovídá počtu $K-\epsilon$ a $K-\omega$ turbulentních modelů v programu Ansys Fluent. Jedná se o modely $K-\epsilon$ Standard, $K-\epsilon$ RNG, $K-\epsilon$ Realizable, $K-\omega$ Standard a $K-\omega$ SST. Byly vytvořeny dva řezy viz Obr. 7. 13, ve kterých byly vyhodnocovány střední hodnoty. Dále byly odečítány hodnoty na vstupu a na výstupech. Celkem bylo odečteno 100 hodnot, které jsou uvedeny v Tab 7. 1. Výsledky lze zobrazit třemi způsoby. Jedná se o zobrazení pomocí vektorů, grafů nebo grafické znázornění. Všechny metody jsou ve výsledcích

prezentovány. Jelikož se jedná o dlouhý model, jsou k základnímu zobrazení veličin přidány i detaily okolo vstupu do sondy.

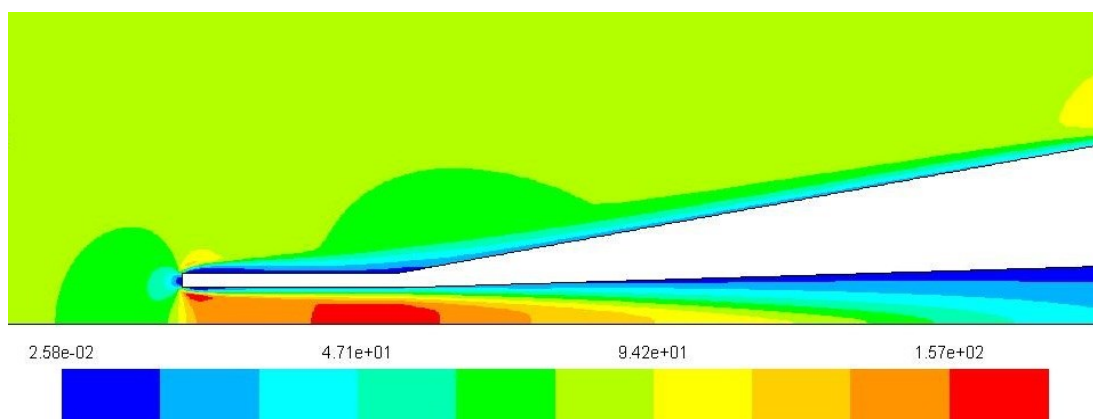
Grafického znázornění výsledků

Výsledky jsou znázorněny pro model $K - \varepsilon$ RNG. V záložce „Graphics and Animations“ se vybere, jakou metodou chceme oblast zobrazit („Contours“ - znázornění pomocí barev, „Vectors“ - znázornění pomocí vektorů).

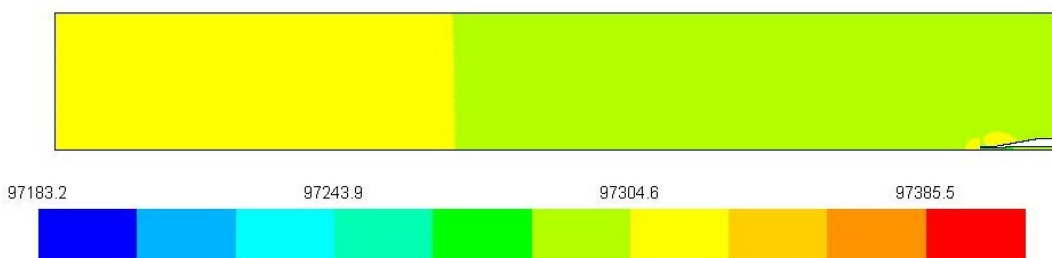
V nabídce „Contours“ se dále určuje, jakou veličinu chceme zobrazit (tlak, rychlost,...). V tomto případě byly zobrazeny tyto veličiny: tlak dynamický, tlak absolutní a velikost rychlosti. Ostatní veličiny jsou zobrazeny v příloze.



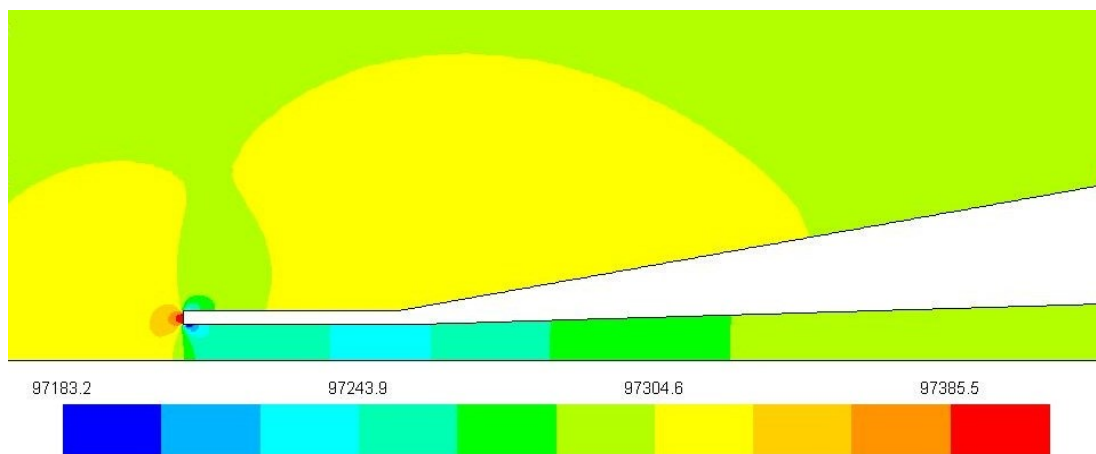
Obr. 7. 7 – Dynamický tlak [Pa]



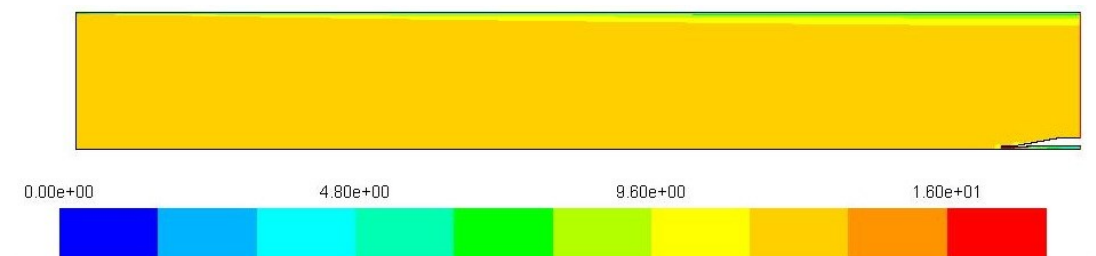
Obr. 7. 8 – Dynamický tlak-detail [Pa]



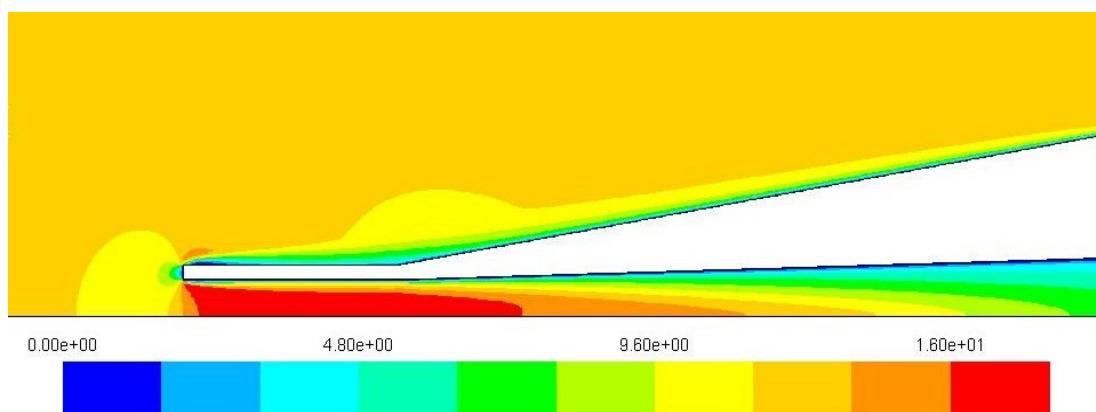
Obr. 7. 9 – Absolutní tlak [Pa]



Obr. 7. 10 – Absolutní tlak-detail [Pa]



Obr. 7. 11 – Velikost rychlosti [m·s⁻¹]



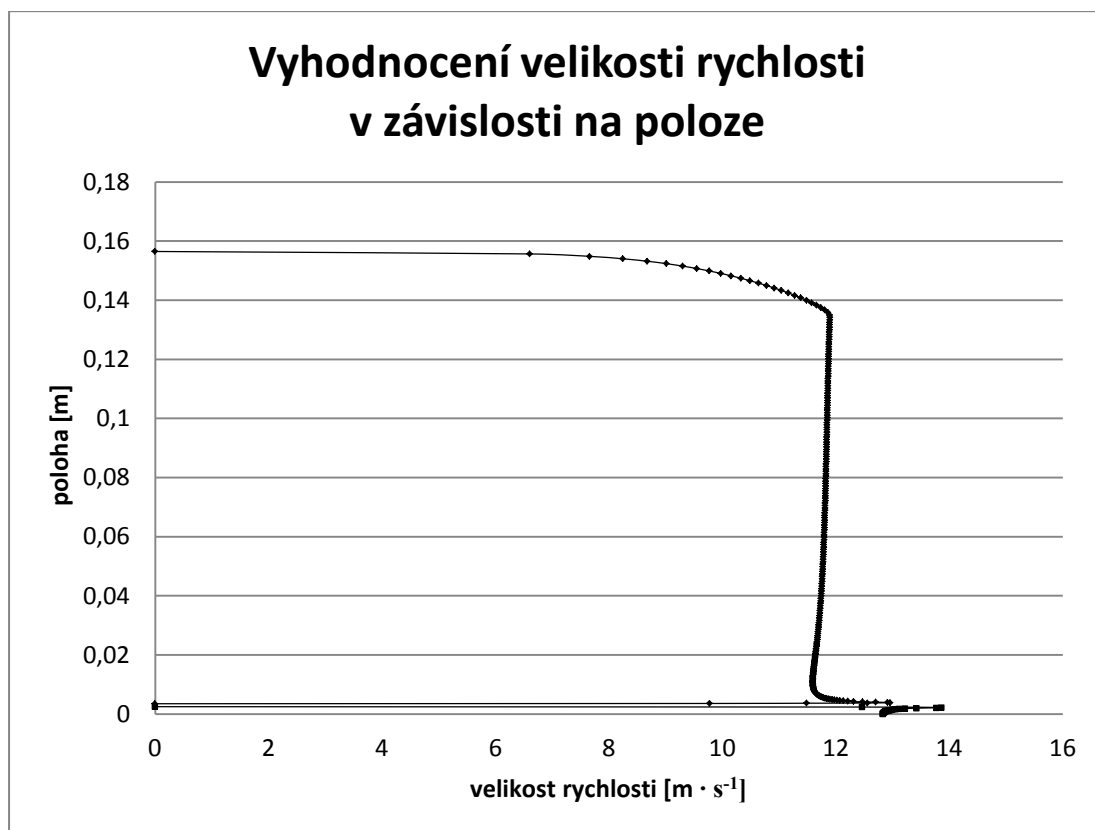
Obr. 7. 12 – Velikost rychlosti-detail [m·s⁻¹]

V příloze jsou dále zobrazeny hodnoty tlaků a rychlostí pro všechny modely. Příloha obsahuje i zobrazení proudového pole pomocí vektorů.

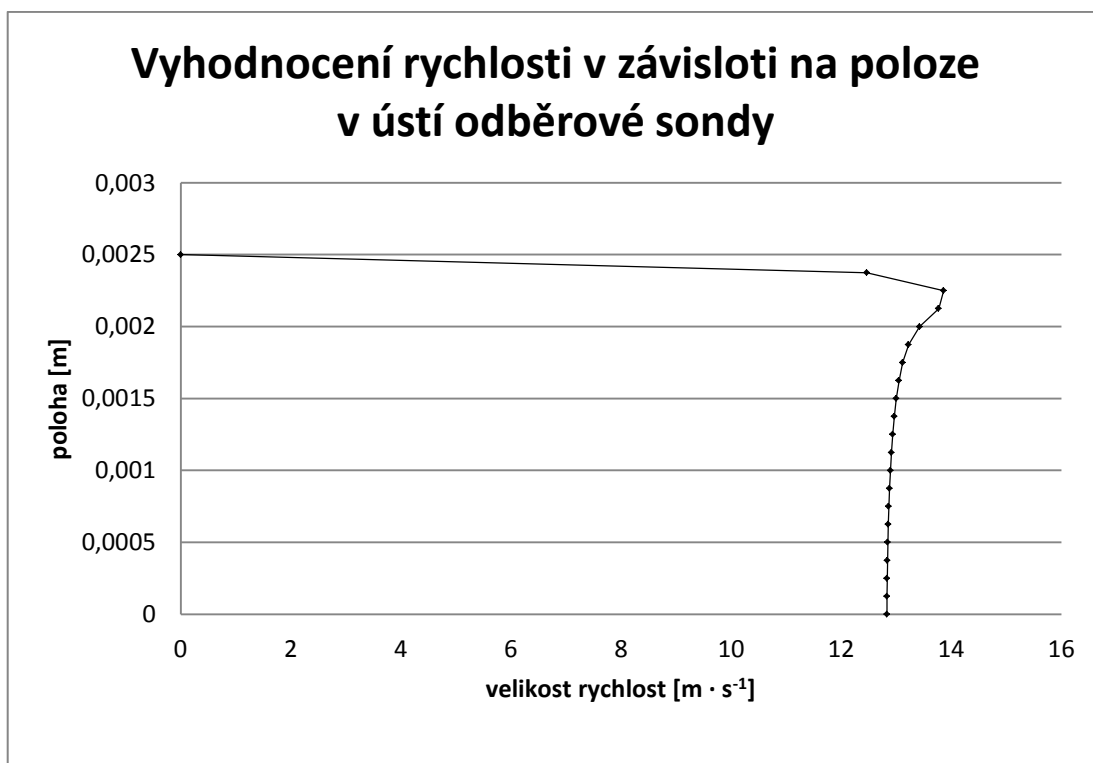
Zobrazení pomocí grafu

V záložce „Plots“ se vybere jaký typ grafu zobrazit. Grafy v diplomové práci byly zobrazeny typem XY. Dále lze vybrat, jakou veličinu zobrazit (tlak, rychlost,...). Zobrazení velikosti rychlosti pomocí grafu je na Graf 7. 1. Graf je vytvořen v řezu nadefinovaném na okraji odběrové sondy, viz Obr. 6. 11. Z důvodu ovlivňování rychlosti u stěn byl vytvořen

graf v oblasti zkráceného řezu. Ukázka řezu je na Obr. 7. 5. Graf 7. 2 je vytvořen v oblasti proudového pole v ústí sondy viz Obr. 6. 14 (pouze řez od osy ke hraně odběrové sondy).



Graf 7. 1 – Velikost rychlosti – graf



Graf 7. 2 – Velikost rychlosti v ústí odběrové sondy

Z výsledků lze vidět, že velikost rychlosti je v oblasti proudění téměř konstantní. Z grafů lze také poznat, že se jedná o neizokinetické proudění. Rychlost v ústí odběrové sondy nabývá hodnot okolo $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, zatímco v okolí odběrové sondy se blíží velikost rychlosti k $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Z tohoto důvodu bude další výpočet zaměřen na dosažení izokinetických podmínek.

7.3 Tabulka vypočtených hodnot při proudění vzduchu

V Tab 7. 1 jsou znázorněny vypočtené hodnoty pro všechny modely K- ε a K- ω . V tabulce je vyhodnocen dynamický tlak, totální tlak, statický tlak a rychlost. Hodnoty byly vyhodnocovány pomocí metody „Area-Weighted Average“, to znamená pomocí střední hodnoty veličiny v daném místě. Hodnoty byly vyhodnocovány v pěti místech. Místa jsou přehledně zobrazeny na Obr. 7. 13. V Tab 7. 1 jsou výsledky přehledně popsány. Pro další výpočty byl vybrán K – ε RNG model.

	Vstup			
	$p_{\text{dyn.}} [\text{Pa}]$	$p_{\text{tot.}} [\text{Pa}]$	$p_{\text{stat.}} [\text{Pa}]$	$v [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
K- ε standard	79.61	87.56	7.95	11.40
K- ε RNG	79.61	87.51	7.90	11.40
K- ε Realizable	79.61	87.37	7.76	11.40
K- Ω Standard	79.60	88.01	8.41	11.40
K- Ω SST	79.60	87.67	8.08	11.40

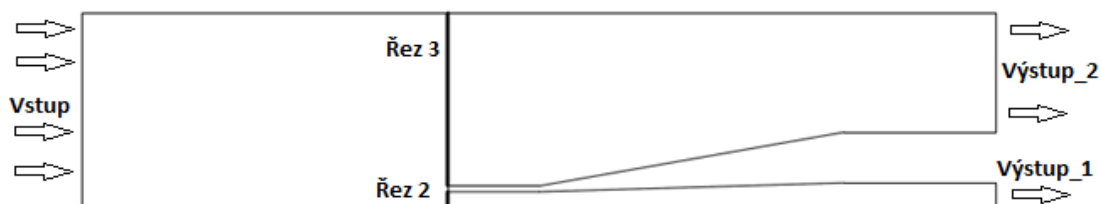
	Řez 2 (ústí do sondy)			
	$p_{\text{dyn.}} [\text{Pa}]$	$p_{\text{tot.}} [\text{Pa}]$	$p_{\text{stat.}} [\text{Pa}]$	$v [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
K- ε standard	105.90	66.54	-39.36	13.06
K- ε RNG	109.05	66.76	-42.29	13.24
K- ε Realizable	110.93	66.30	-44.63	13.35
K- Ω Standard	82.87	56.89	-25.97	11.61
K- Ω SST	127.14	65.65	-61.49	14.30

	Řez 3 (sonda vnější)			
	$p_{\text{dyn.}} [\text{Pa}]$	$p_{\text{tot.}} [\text{Pa}]$	$p_{\text{stat.}} [\text{Pa}]$	$v [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
K- ε standard	80.39	81.87	1.49	11.41
K- ε RNG	80.40	81.88	1.48	11.41
K- ε Realizable	80.43	81.89	1.46	11.41
K- Ω Standard	80.55	82.03	1.48	11.41
K- Ω SST	80.54	81.99	1.45	11.41

	Výstup 1			
	$p_{dyn.} [Pa]$	$p_{tot.} [Pa]$	$p_{stat.} [Pa]$	$v [m \cdot s^{-1}]$
K- ϵ standard	16.00	16.00	0.00	4.95
K- ϵ RNG	16.37	16.37	0.00	5.00
K- ϵ Realizable	16.65	16.65	0.00	5.04
K- Ω Standard	13.66	13.66	0.00	4.45
K- Ω SST	19.48	19.48	0.00	5.34

	Výstup 2			
	$p_{dyn.} [Pa]$	$p_{tot.} [Pa]$	$p_{stat.} [Pa]$	$v [m \cdot s^{-1}]$
K- ϵ standard	81.39	81.39	0.00	11.48
K- ϵ RNG	81.41	81.41	0.00	11.48
K- ϵ Realizable	81.44	81.44	0.00	11.48
K- Ω Standard	81.56	81.56	0.00	11.48
K- Ω SST	81.55	81.55	0.00	11.42

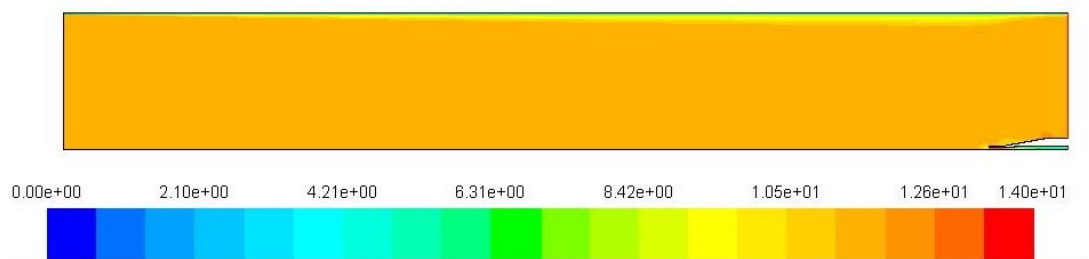
Tab. 7. 1 – Tabulka naměřených hodnot pro modely K – Epsilon a K - Omega



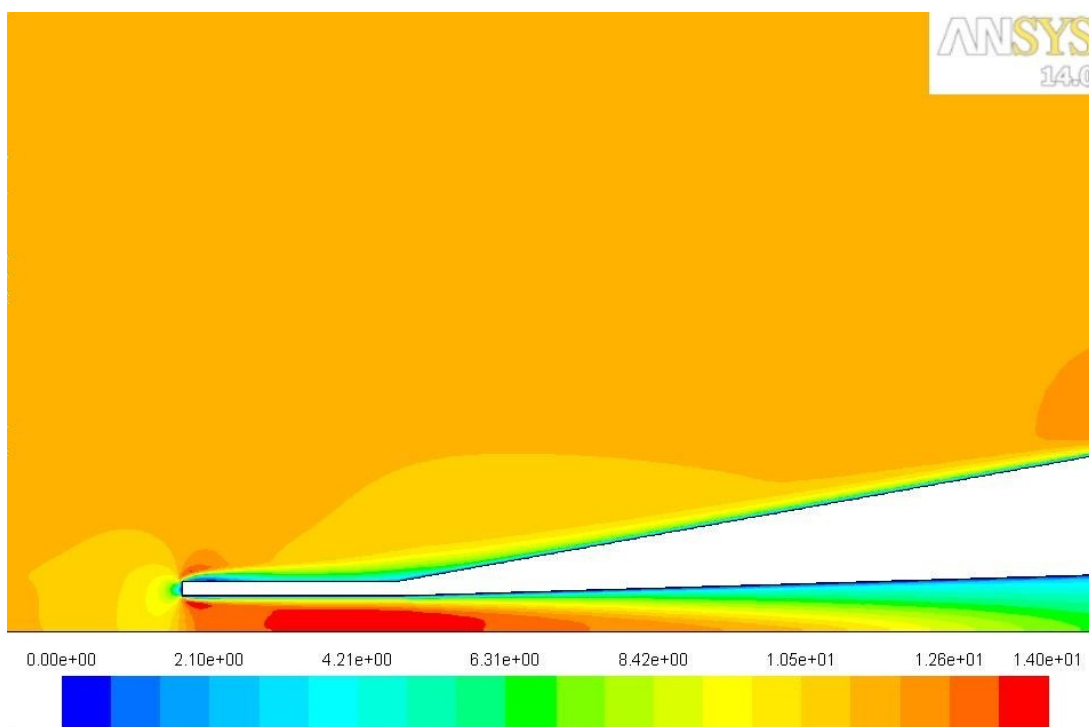
Obr. 7. 13 – Zobrazení řezů pro odečítání hodnot pro proudění vzduchu

7.4 Nastavení izokinetického proudění (Varianta 2)

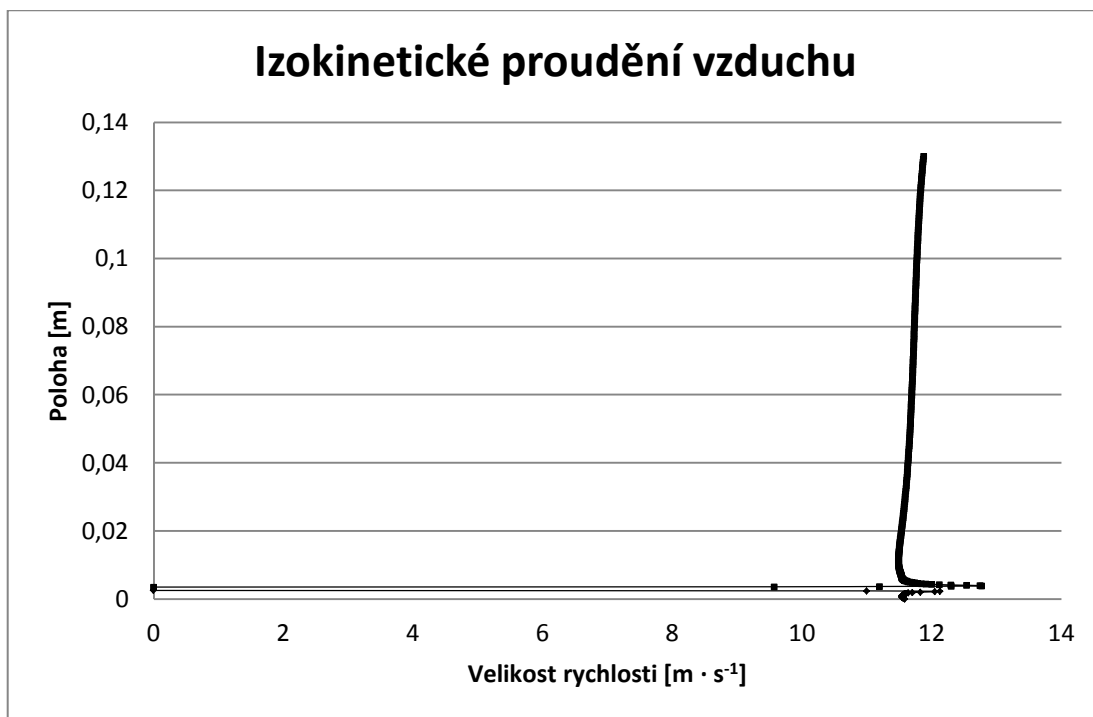
Tato kapitola se zabývá docílením izokinetického proudění vzduchu v ústí a okolo odběrové sondy (dosažení stejné střední rychlosti). Obr. 7. 5 definuje místo odečítání velikosti rychlosti. Rychlost byla vyhodnocena pomocí příkazu „Area-Weighted Average“, což definuje střední hodnotu. Izokinetiky bylo docíleno pomocí definování přetlaku na výstupní okrajové podmínce z odběrové sondy. Grafické zobrazení rychlostního pole na prašné trati je zobrazeno na Obr. 7. 14 a Obr. 7. 15.



Obr. 7. 14 – Velikost rychlosti [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] (izokinetické proudění)



Obr. 7. 15 – Velikost rychlosti - detail [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] (izokinetické proudění)



Graf 7. 3 – Velikost rychlosti (izokinetické proudění)

Střední hodnota rychlosti proudění vzduchu v ústí sondy a okolo odběrové sondy je rovna $11.748 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

7.5 Proudění vzduchu s částicemi (varianta 3)

Nadefinování částic

Částice byly nadefinovány velikosti a hmotnostním průtokem. Byly nadefinovány částice o velikostech $10 \text{ } \mu\text{m}$, $50 \text{ } \mu\text{m}$ a $100 \text{ } \mu\text{m}$. Výpočet byl proveden pro konstantní nastavení hustoty i hmotnostního průtoku. Rozložení částic bylo nastaveno celoplošně na vstup.

Nadefinování parametrů pevných částic

Velikost: $10 \text{ } \mu\text{m}$, $50 \text{ } \mu\text{m}$ a $100 \text{ } \mu\text{m}$

Hustota: $2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Průtok: $100 \text{ g} \cdot \text{hod}^{-1} = 2,77778 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Vstup: částice jsou rozloženy celoplošně na vstupu a strhávány proudem vzduchu

Materiál: křemík (Si)

Nastavení částic v programu Ansys Fluent

Částice nastavíme v záložce „Models“ pomocí příkazu „Discrete Phase“. Otevřením okna po kliknutí na tlačítko „Injections“ se nadefinuje trajektorie, velikost a hmotnostní průtok částic. Trajektorie je definována jako celoplošně („surface“) na vstupu. Velikost částic se nastaví v políčku „Diameter“. Velikost se zadává v metrech. Další políčko slouží k zadání hmotnostního průtoku („Total Flow Rate“), který se zadává v $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Důležité je zaškrtnout tlačítko „Scale Flow Rate by Face Area“. Materiál se zvolí v nabídce „Material“. Pokud prvek, který je požadován, není v nabídce, zvolí se materiál, který má hodnotu hustoty nejbližší své hustotě.

Pokud se stane, že se vybral materiál s nejbližší hodnotou, lze to v nabídce „Materials“ předefinovat. Po otevření zvoleného materiálu pro pevné částice, se do pole hustoty napíše hodnota hustoty definovaného materiálu. V tomto matematickém modelu byly pevné částice z křemíku, což odpovídá hustotě $2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

7.6 Zobrazení výsledků numerické simulace s pevnými částicemi v proudovém poli

Byly provedeny výpočty o třech různých nastaveních granulometrie pevných částic. Každý z výpočtu obsahuje 10 nebo 9 výpočtů. Výpočty byly provedeny pro různé hodnoty izokinetického poměru. Ten byl nastavován pomocí přetlaku resp. podtlaku na výstupu z odběrové sondy. Po dokončení numerického výpočtu byly odečteny 4 hodnoty. Základní hodnoty pro vynesení výsledků do grafu je izokinetický poměr, tj. poměr rychlosti proudění v ústí sondy k rychlosti proudění okolo sondy, a poměr koncentrací pevných částic před sondou a na výstupu ze sondy. Koncentrace pevných částic před sondou je koncentrace referenční c_{ref} , která se mění ve výpočtech minimálně. Koncentrace na výstupu z odběrové sondy $c_{\text{měř}}$ se mění v závislosti na kinetickém poměru. Tabulky vyhodnocených hodnot pro jednotlivé nastavení velikosti pevných částic jsou uvedeny v Tab 7. 2 až Tab 7. 4.

Tab. 7. 2 – Tabulka naměřených hodnot koncentrací a rychlosti pro velikost částic 10 μm

Cref [kg · m ⁻³]	Cměř [kg · m ⁻³]	Cměř/Cref [1]	v_N - ustí [m · s ⁻¹]	v_A - vně [m · s ⁻¹]	Izokinetický poměr [1]
3.11E-05	4.55E-05	1.46E+00	5.006874	11.83575	0.42302983
3.08E-05	3.40E-05	1.11E+00	6.925781	11.83592	0.58514924
3.08E-05	3.17E-05	1.03E+00	7.907721	11.83556	0.66813236
3.08E-05	3.08E-05	1.00E+00	8.841641	11.83522	0.74706188
3.08E-05	2.84E-05	9.24E-01	10.95703	11.83449	0.92585587
3.11E-05	2.96E-05	9.51E-01	11.8445	11.83332	1.00094471
3.08E-05	2.85E-05	9.27E-01	12.17576	11.83404	1.02887653
3.11E-05	2.68E-05	8.62E-01	12.83214	11.83298	1.08443839
3.11E-05	2.79E-05	8.97E-01	13.60113	11.83274	1.14944851
3.11E-05	2.65E-05	8.54E-01	14.35085	11.83252	1.21283179

Tab. 7. 3 – Tabulka naměřených hodnot koncentrací a rychlosti pro velikost částic 50 μm

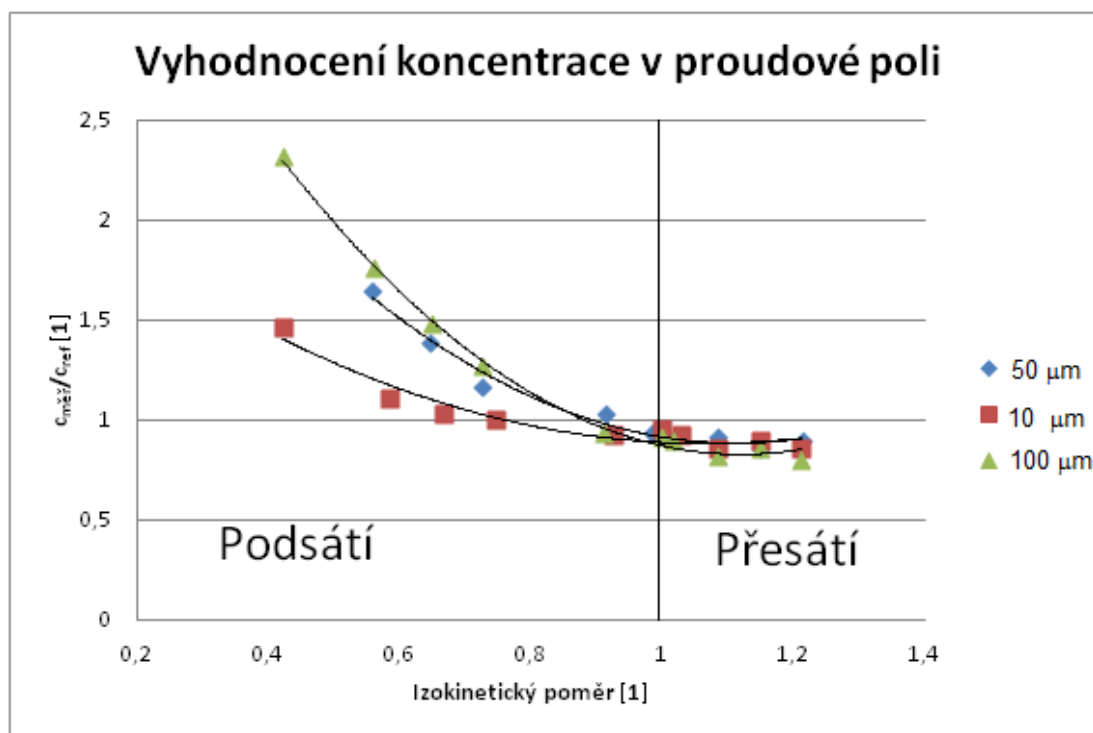
Cref [kg · m ⁻³]	Cměř [kg · m ⁻³]	Cměř/Cref [1]	v_N - ustí [m · s ⁻¹]	v_A - vně [m · s ⁻¹]	Izokinetický poměr [1]
3.11E-05	5.12E-05	1.65E+00	6.620513	11.83498	0.559402257
3.10E-05	4.31E-05	1.39E+00	7.643724	11.83479	0.645869014
3.10E-05	3.60E-05	1.16E+00	8.587304	11.83441	0.725621465
3.10E-05	3.19E-05	1.03E+00	10.8076	11.83367	0.913292466
3.10E-05	2.89E-05	9.34E-01	11.64445	11.83341	0.98403224
3.10E-05	2.77E-05	8.94E-01	12.04697	11.83326	1.018059937
3.10E-05	2.84E-05	9.16E-01	12.83269	11.83336	1.084450507
3.10E-05	2.66E-05	8.59E-01	13.60771	11.8328	1.149998538
3.10E-05	2.77E-05	8.96E-01	14.35432	11.83255	1.213121722

Tab. 7. 4 – Tabulka naměřených hodnot koncentrací a rychlosti pro velikost částic 100 μm

C_{ref} [kg · m⁻³]	C_{měř} [kg · m⁻³]	C_{měř}/C_{ref} [1]	v_N - ústí [m · s⁻¹]	v_A - vně [m · s⁻¹]	Izokinetický poměr [1]
3.08E-05	7.16E-05	2.32E+00	5.00733	11.83575	0.42306824
3.08E-05	5.42E-05	1.76E+00	6.640428	11.8332	0.561169356
3.07E-05	4.56E-05	1.48E+00	7.673816	11.83498	0.648401062
3.08E-05	3.91E-05	1.27E+00	8.579074	11.83435	0.724929878
3.08E-05	2.89E-05	9.37E-01	10.79508	11.83356	0.912243061
3.08E-05	2.82E-05	9.16E-01	11.84349	11.83331	1.000860706
3.08E-05	2.76E-05	8.97E-01	12.04356	11.83324	1.017774257
3.08E-05	2.52E-05	8.19E-01	12.83218	11.83298	1.084441768
3.08E-05	2.64E-05	8.58E-01	13.60123	11.83275	1.149456614
3.08E-05	2.46E-05	8.00E-01	14.35078	11.83252	1.212825453

Zobrazení výsledků koncentrace v proudovém poli pomocí grafu

Na ose x je vynesena izokinetický poměr, tedy poměr rychlosti proudění v ústí sondy a rychlosti proudění okolo sondy viz Obr. 3. 3. Na ose y je vynesena poměr koncentrací $C_{\text{ref}}/C_{\text{měř}}$. S rostoucím izokinetickým poměrem (přesátím), tedy pokud se rychlost v ústí sondy zvyšuje, koncentrace pevných částic na výstupu ze sondy klesá. Je to dáno, že podtlakem je do sondy strhávám pouze vzduch bez částic. Podsátí je definováno jako nárůst tlaku na odběrové sondě. V oblasti, kdy izokinetický poměr nabývá hodnoty 1, se koncentrace při zvětšujícím se přesátí rovnoměrně drží takřka konstantních hodnot. To znamená, že výsledek je správně. Vyhodnocení koncentrace v proudovém poli je na Graf 7. 4.

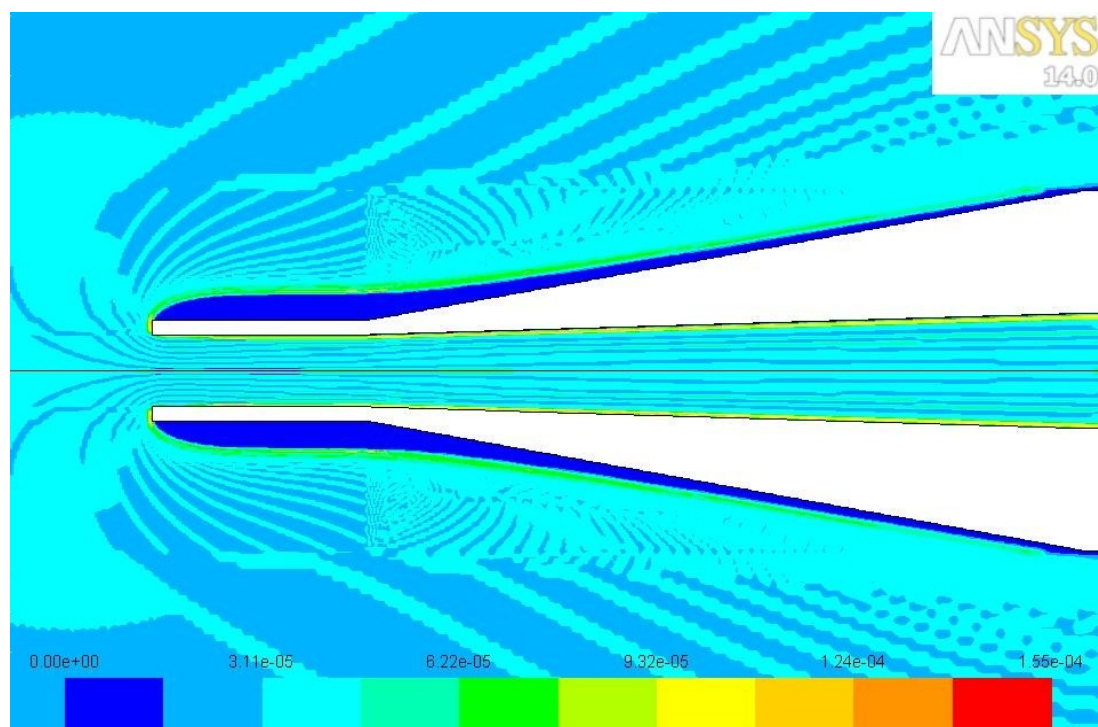


Graf 7. 4 – Vyhodnocení koncentrace v proudovém poli

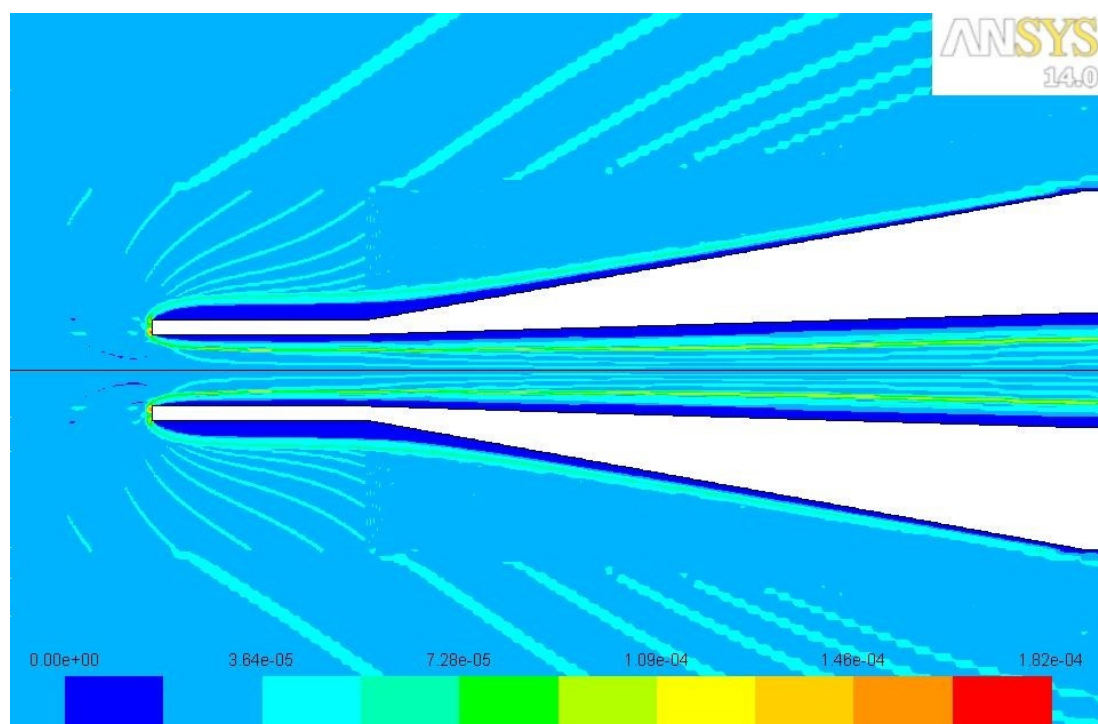
Vyhodnocení koncentrace v proudovém poli

Grafické zobrazení je provedeno pro izokinetické proudění vzduchu a částic v proudovém poli a pro obě mezní hodnoty. Mezní hodnoty jsou definovány jako minimální kinetický poměr a maximální kinetický poměr. Byly vyhodnoceny všechny varianty proudění velikosti pevných částic. První obrázek v odrážce definuje vždy podsátí, druhý je při izokinetickém poměru a třetí znázornění vyjadřuje míru přesátí. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 7. 16 až Obr. 7. 21.

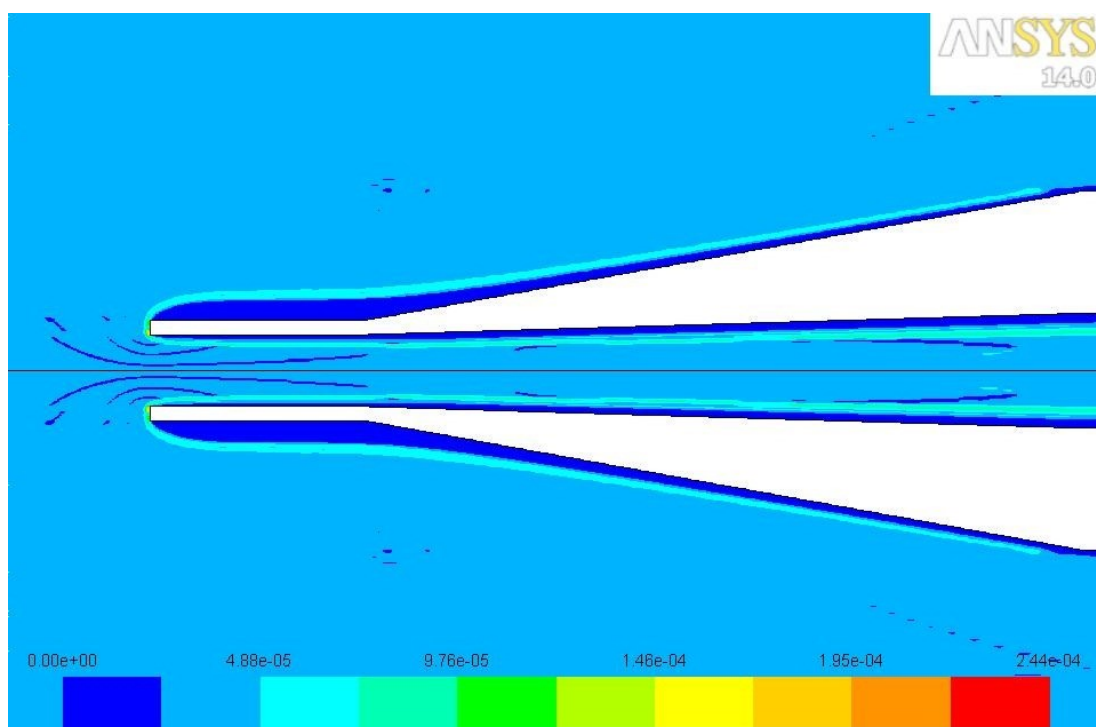
- vyhodnocení pro velikost pevných částic 10 μm



Obr. 7. 16 - grafické znázornění koncentrace prachu [kg.m^{-3}] pro podsátí o velikosti 10 μm

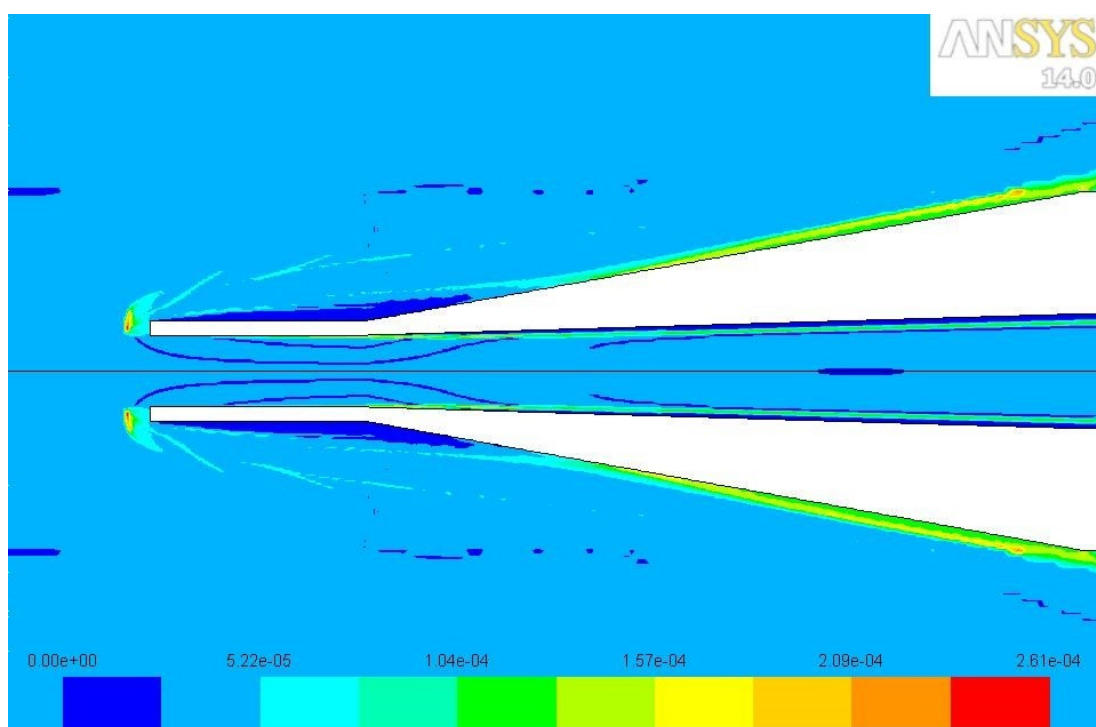


Obr. 7. 17 - grafické znázornění koncentrace prachu [kg.m^{-3}] pro izokinetiku o velikosti 10 μm

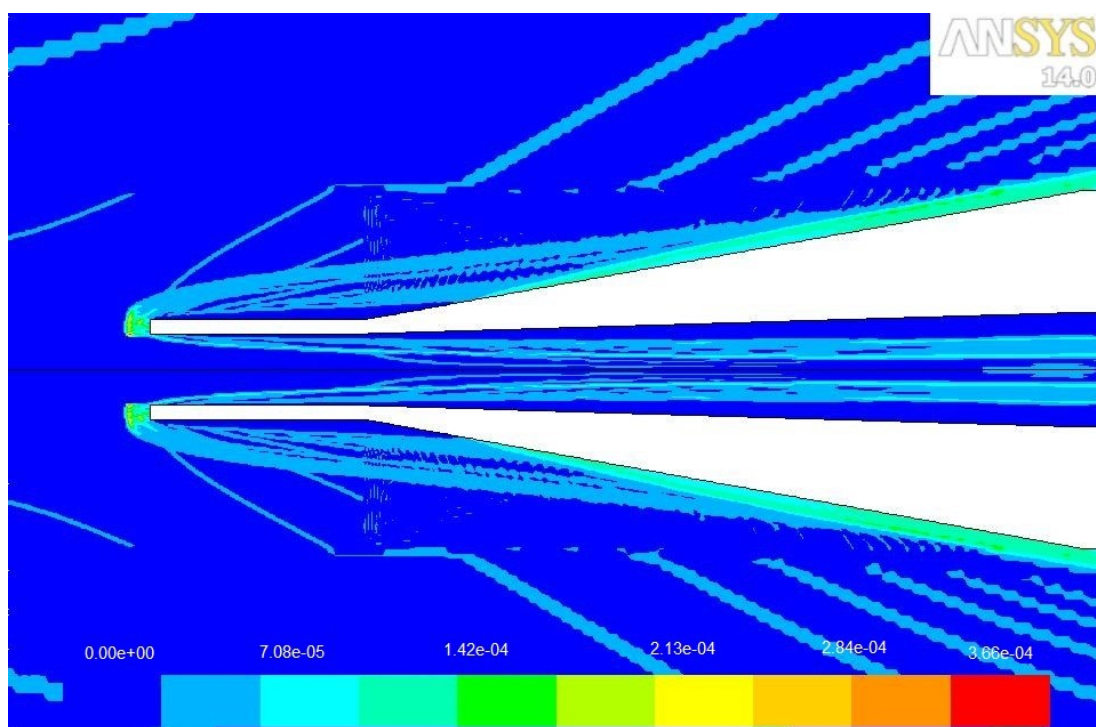


Obr. 7. 18 - grafické znázornění koncentrace prachu [kg.m^{-3}] pro přesátí o velikosti $10\ \mu\text{m}$

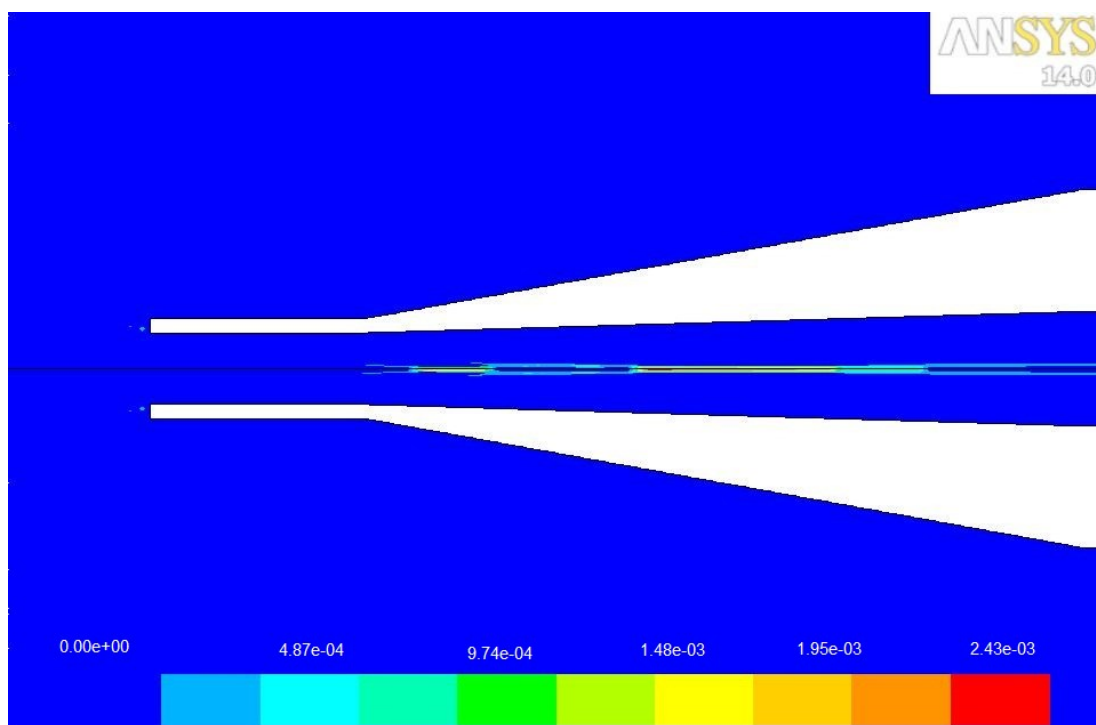
- vyhodnocení pro velikost pevných částic $50\ \mu\text{m}$



Obr. 7. 19 - grafické znázornění koncentrace prachu [kg.m^{-3}] pro podsátí o velikosti $50\ \mu\text{m}$



Obr. 7. 20 - grafické znázornění koncentrace prachu [kg.m^{-3}] pro izokinetiku o velikosti $50\ \mu\text{m}$



Obr. 7. 21 - grafické znázornění koncentrace prachu [kg.m^{-3}] pro přesátí o velikosti $50\ \mu\text{m}$

8. Závěr

Diplomová práce se zabývala problematikou tuhých znečišťujících látek a jejich proudění v proudovém poli. Veškeré hodnoty, které byly definovány, byly přiděleny z Výzkumného energetického centra VŠB – Technické univerzity Ostrava, kde se nachází experimentální zařízení pro měření koncentrace tuhých znečišťujících látek na prašné trati.

První část diplomové práce byla zaměřena na vlastnosti pevných částic. Bylo popsáno, jak se pevné částice rozdělují, co je pro ně charakteristické, jaký mají dopad na zdraví lidí a zvířat, jejich vznik a jakým způsobem ovlivňují život na Zemi. V další fázi byl popsán experimentální odběr tuhých znečišťujících látek gravimetrickou metodou. V této kapitole byly popsány odběrové sondy a vyjmenované základní typy. Odběrová sonda, která je využita, jako model pro následné matematické modelování proudění vzduchu a prachových částic je popsána v diplomové práci v kapitole 5. Dále je v práci popsáno experimentální zařízení umístěné ve Výzkumném energetickém centru VŠB – Technické univerzity Ostrava, odkud byly dodány vstupní parametry pro aplikaci matematického modelování proudění částic na prašné trati. Z Obr. 3. 4 je patrná výpočtová oblast, která byla použita pro tvorbu modelu pro následnou numerickou simulaci.

V další kapitole byl definován matematický model proudění v prašné trati. V kapitole 4 byla popsána metoda konečných objemů a její aplikace na řešení rovnice kontinuity. Diplomová práce byla zaměřena na stanovení koncentrace prachu na prašné trati, proto je v této kapitole podrobně popsán vícefázový model v Euler-Lagrangeově pojetí, který byl následně aplikován. Na prašné trati se jedná o vícefázové proudění vzduchu a pevných částic. Matematický model byl definován v programovém softwaru Ansys Fluent 14.0, který je součástí softwaru Ansys.

Poté byla vytvořena geometrie matematického modelu prašné trati. Geometrie byla vytvořena v programu DesingModeler v softwaru Ansys. Model byl vytvořen jako 2D osově symetrický. Geometrie byla vytvořena pouze v proudění vzduchu. Odběrová sonda je zobrazena na Obr. 5. 2. Pro matematický model proudění na prašné trati byl nadefinován zjednodušený model, který se nezabýval detaily. Po vytvoření geometrie byla vytvořena výpočetní síť. Výpočetní síť byla nadefinována v programu AnsysMeshing, který je součástí softwaru Ansys. Při vytvoření výpočetní sítě byl kladen důraz na místo u odběrové sondy, kde byla síť zhuštěna. Důležitým krokem bylo pojmenování všech stěn. Po vygenerování sítě byl model vyexportován do programového softwaru Ansys Fluent, který je součástí softwaru Ansys. V programu Ansys Fluent byly nadefinovány okrajové podmínky a fyzikální vlastnosti.

Numerický výpočet matematického modelu proudění na prašné trati byl nejdříve proveden pro proudění samotného vzduchu. V tomto kroku byly testovány turbulentní modely. Srovnání turbulentních modelů bylo provedeno pomocí středních hodnot statického tlaku, dynamického tlaku a velikosti rychlosti. Střední hodnoty veličin byly vyhodnocovány na vstupu, výstupu z odběrové sondy, výstupu z prašné trati a na zvolených místech pomocí vytvořených řezů. Vytvoření řezů bylo v kapitole 7. 1 podrobně popsáno. Jednalo se o místa v ústí a okolo odběrové sondy. Tabulka odečtených hodnot pomocí programu Ansys Fluent je zobrazena v kapitole 7. 3. Z výsledků lze vidět, že velikost rychlosti v ústí odběrové sondy nabývá hodnot okolo $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, zatímco v okolí odběrové sondy se blíží velikost rychlosti k $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a tedy jedná se o neizokinetické proudění. Jako nejvhodnější byl vybrán turbulentní model $K - \varepsilon$ RNG. Další krok se zabýval izokinetickým prouděním v oblasti ústí a okolo odběrové sondy. To bylo provedeno pomocí změny přetlaku na výstupní okrajové podmínce z odběrové sondy. Rychlost proudění vzduchu v ústí a okolo odběrové sondy je rovna $11.748 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro izokinetické proudění.

Po dosažení izokinetického proudění v oblasti odběrové sondy byl matematický model proudění na prašné trati rozšířen o proudění pevných částic. Nadefinování částic je podrobně popsáno v kapitole 7. 4. Jednalo se o nadefinování velikosti částic, fyzikálních vlastností částic, průtoku částic na vstupní okrajové podmínce do výpočetní oblasti. Numerický výpočet se zabýval třemi různými nastaveními granulometrie částic ($10 \text{ }\mu\text{m}$, $50 \text{ }\mu\text{m}$ a $100 \text{ }\mu\text{m}$). Změnou přetlaku na výstupu z odběrové sondy byl měněn kinetický poměr, přesátí resp. podsátí, v oblasti odběrové sondy. Každé nastavení přetlaku, resp. podtlaku bylo zaznamenáno do tabulky v kapitole 7. 6. S klesajícím kinetickým poměrem se zvyšovala koncentrace tuhých částic $c_{\text{měř}}$ na výstupu z odběrové sondy. Naopak při přesátí byla koncentrace pevných částic $c_{\text{měř}}$ takřka konstantní bez ohledu na změnu tlaku na výstupní okrajové podmínce. Při zvětšujícím se kinetickém poměru roste rychlost v ústí sondy, ale koncentrace klesá (odebíráme méně prachových částic). Je to v důsledku strhávání proudu vzduchu, nikoliv částic. V opačném případě (zmenšující kinetický poměr - klesá rychlost v ústí sondy - odebíráme více prachu). Vyhodnocení poměr výstupní koncentrace $c_{\text{měř}}$ z odběrové sondy k referenční koncentraci c_{ref} v závislosti na izokinetickém poměru je znázorněno v Graf. 7.4 pro různé granulometrie. Předchozí předpoklad byl numerickým výpočtem potvrzen. Grafické zobrazení rozložení koncentrace prachových částic v ústí a okolí sondy je zobrazeno v kapitole 7. 6. Výsledky jsou zobrazeny pro částice o velikosti $10 \text{ }\mu\text{m}$ a $50 \text{ }\mu\text{m}$. Výsledky matematického modelování jsou porovnatelné s grafy z experimentálního měření na prašné trati, viz Obr. 3. 5 a Obr. 3. 6. Oba výsledky mají stejný klesající trend, což značí správné nadefinování matematického modelu prašné trati.

9. Literatura

- [1] KOZUBKOVÁ, M.: [i]Modelování proudění FLUENT, CFX[/i], VŠB-TU Ostrava, 2008, 142 s.
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>.
- [2] BOJKO, M.: [i]Návody do cvičení „Modelování proudění“ - FLUENT[/i], VŠB-TU Ostrava, 2008. 141 s. ISBN 978-80-248-1909-9.
< <http://www.338.vsb.cz/PDF/Bojko-Fluent.pdf>>
- [3] FLUENT: [i]Fluent 13.0 - ANSYS FLUENT TheoryGuide[/i], ANSYS, Inc. 2010.
- [4] BOJKO, M.: [i]3D proudění – AnsysFluent učební text[/i], VŠB-TU Ostrava, 2012, 314 s. ISBN 978-80-248-2607-3. < <http://www.338.vsb.cz/PDF/3D-Bojko.pdf>>
- [5] KOVÁŘ, R.: [i]Vliv ne-izokinetiky odběru vzorku na stanovení koncentrace TZL[/i]. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, 2011, 66 s.
- [6] ISO 9096 Stacionární zdroje emisí – Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí – Manuální gravimetrická metoda
- [7] ČSN EN 13284-1 Stacionární zdroje emisí – Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu - – Manuální gravimetrická metoda.
- [8] Pevné částice. *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Pevn%C3%A9_%C4%8D%C3%A1stice
- [9] Polétavý prach. *Irz* [online]. 2013 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: http://www.irz.cz/repository/latky/poletavy_prach.pdf
- [10] Emise. *Emise* [online]. 2013 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.emise.cz/>
- [11] Gravimetric Methods. *Ecs* [online]. 2013 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.ecs.umass.edu/cee/reckhow/courses/572/572bk15/572BK15.html>
- [12] OCHODEK, T. *Technik měření emisí*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2002, 198 s. ISBN 80-248-0156-6.

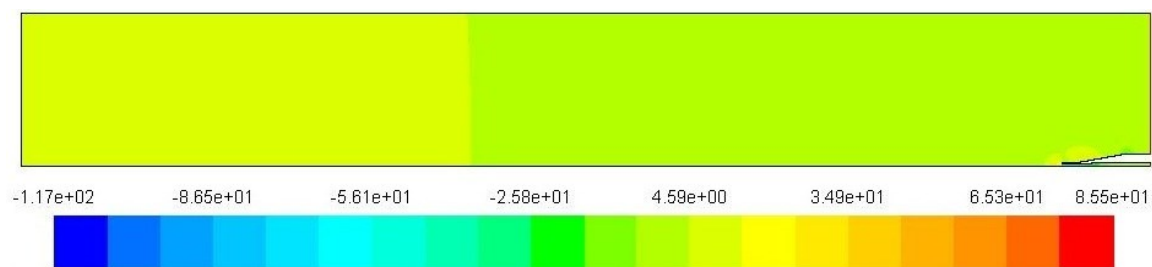
- [13] ADAMEC, R.: [i] Optimalizace proudění páry v hasící věži koksárenské baterie[/i]. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, 2012, 80 s.
- [14] Simulace a modelování hydraulických systémů. KOZUBKOVÁ, Milada. *VŠB-TU Ostrava*[online]. 2009 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Simulace2009.pdf>
- [15] Vzduch. *Converter* [online]. 2002 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>

10. Seznam příloh

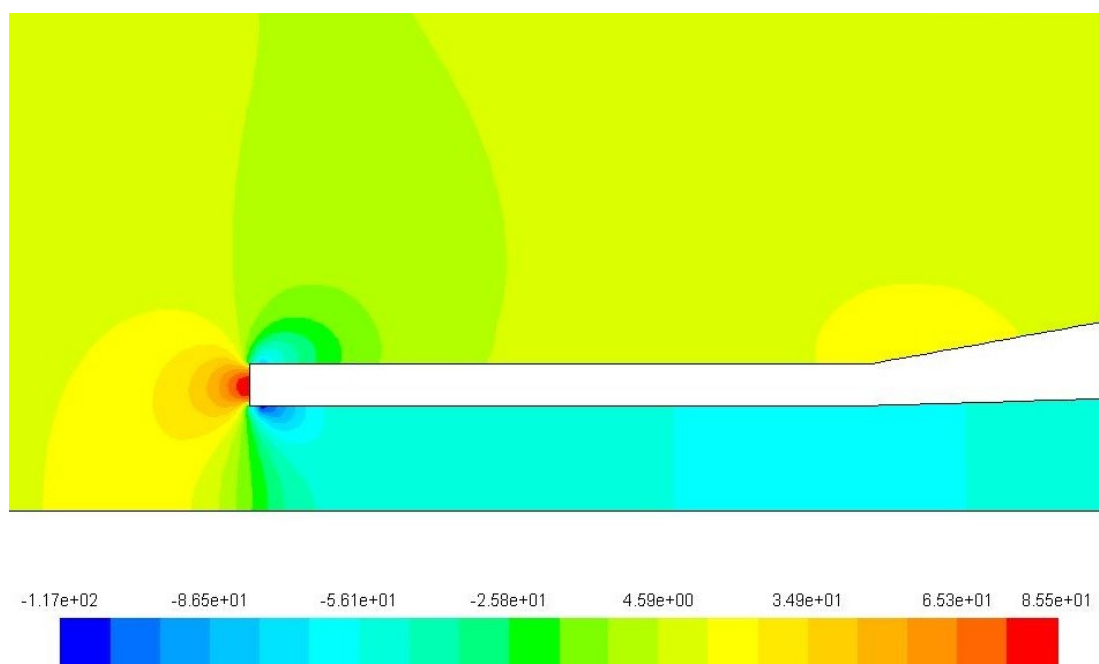
A	Zobrazení výsledků numerické simulace pro proudění vzduchu pro matematický model $K - \varepsilon$ RNG.....	64
B	Zobrazení statického tlaku pro všechny matematické modely	66
C	Zobrazení velikosti rychlosti pro všechny matematické modely	70
D	Zobrazení rychlosti pomocí vektorů pro všechny matematické modely	74

Příloha:

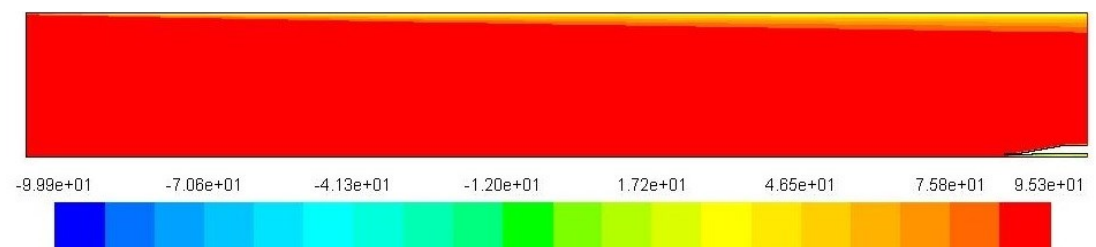
A **Zobrazení výsledků numerické simulace pro proudění vzduchu pro matematický model K – ε RNG.**



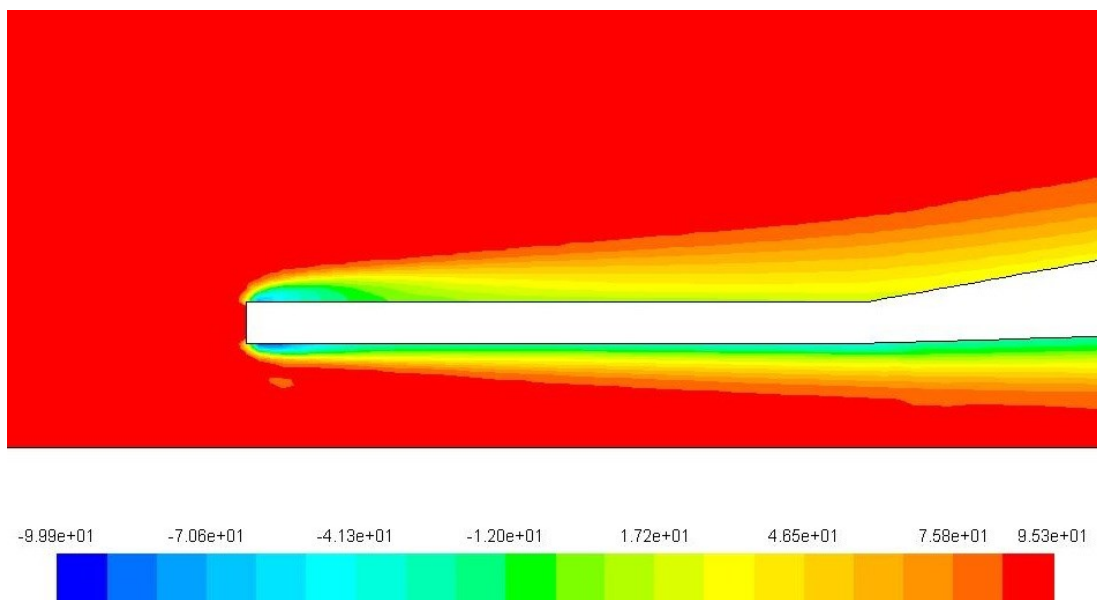
Obr. A. 1 – Statický tlak [Pa]



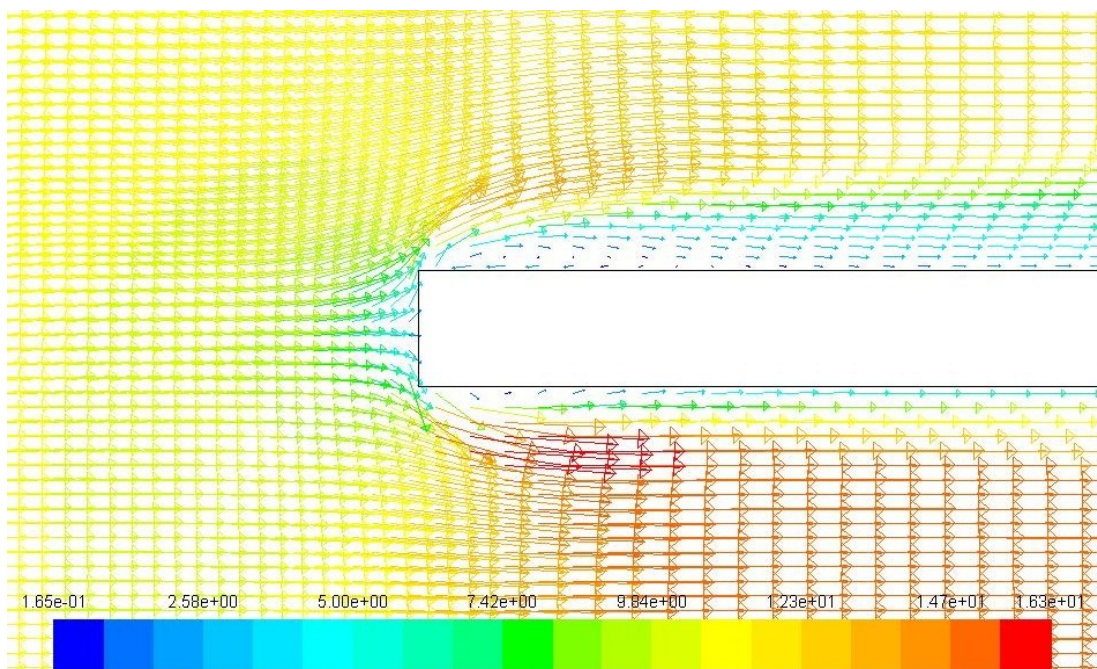
Obr. A. 2 – Statický tlak-detail [Pa]



Obr. A. 3 – Totální tlak [Pa]

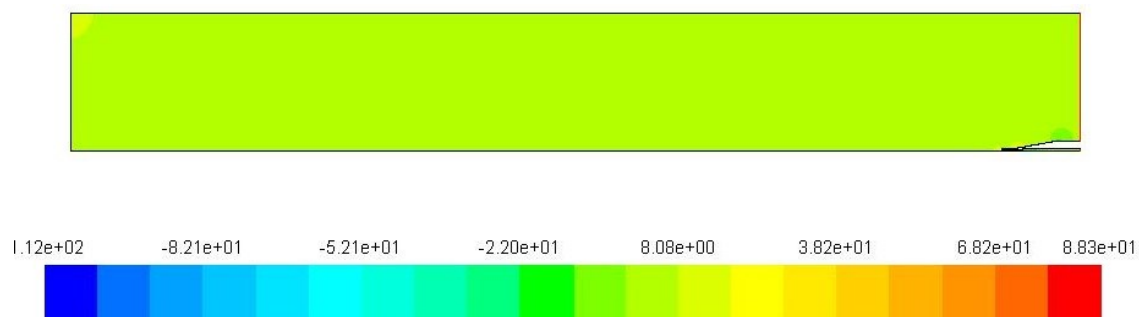


Obr. A. 4 – Totální tlak-detail [Pa]

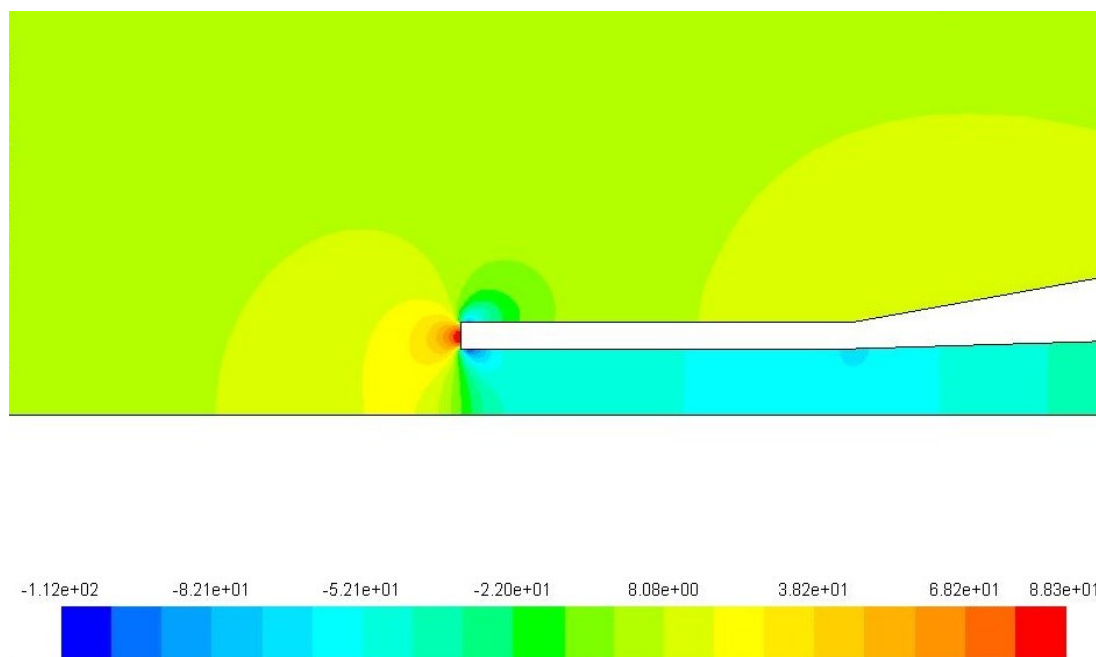


Obr. A. 5 – Velikost rychlosti – vektory [m·s⁻¹]

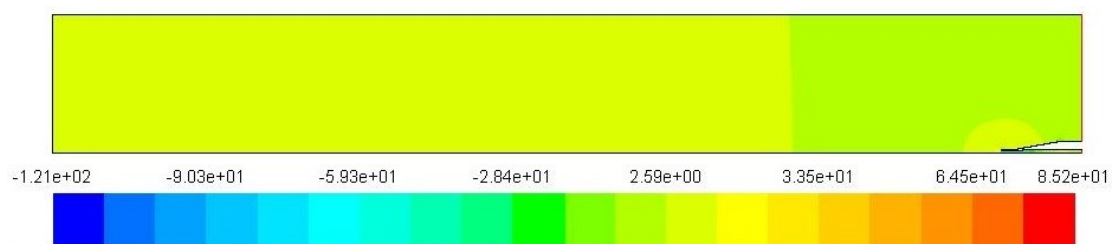
B Zobrazení statického tlaku pro všechny matematické modely



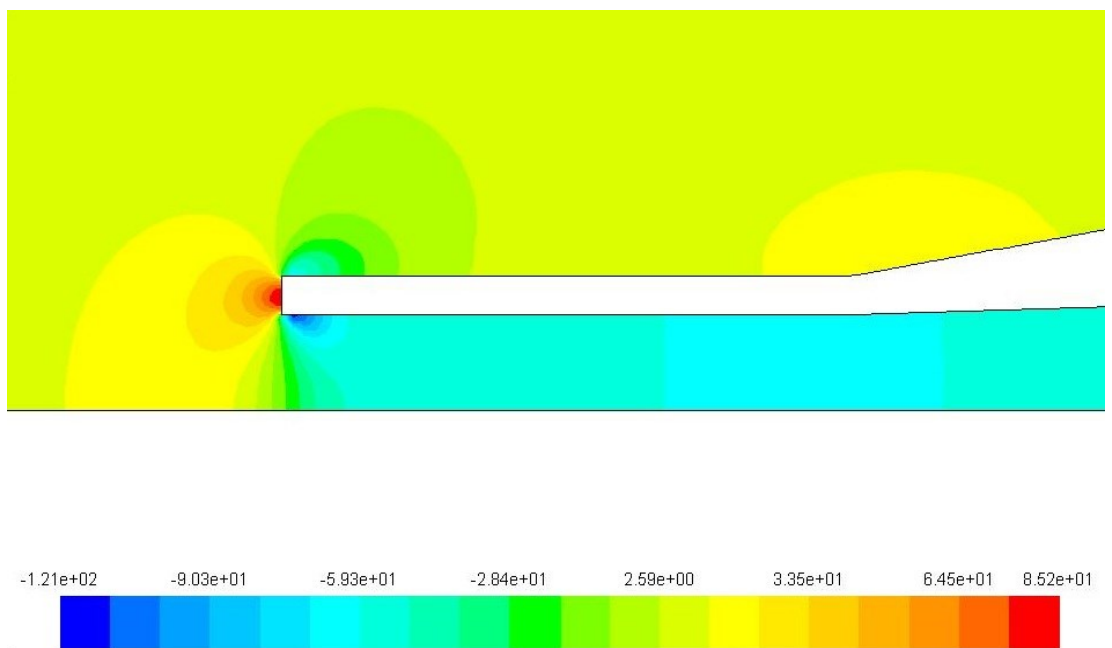
Obr. B. 1 – K- ϵ standard – statický tlak [Pa]



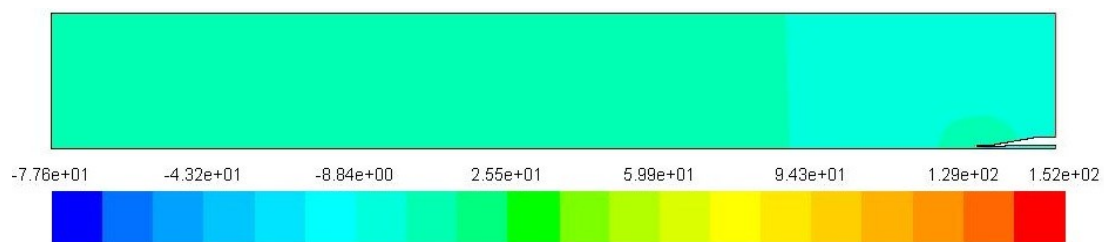
Obr. B. 2 – K- ϵ standard – statický tlak-detail [Pa]



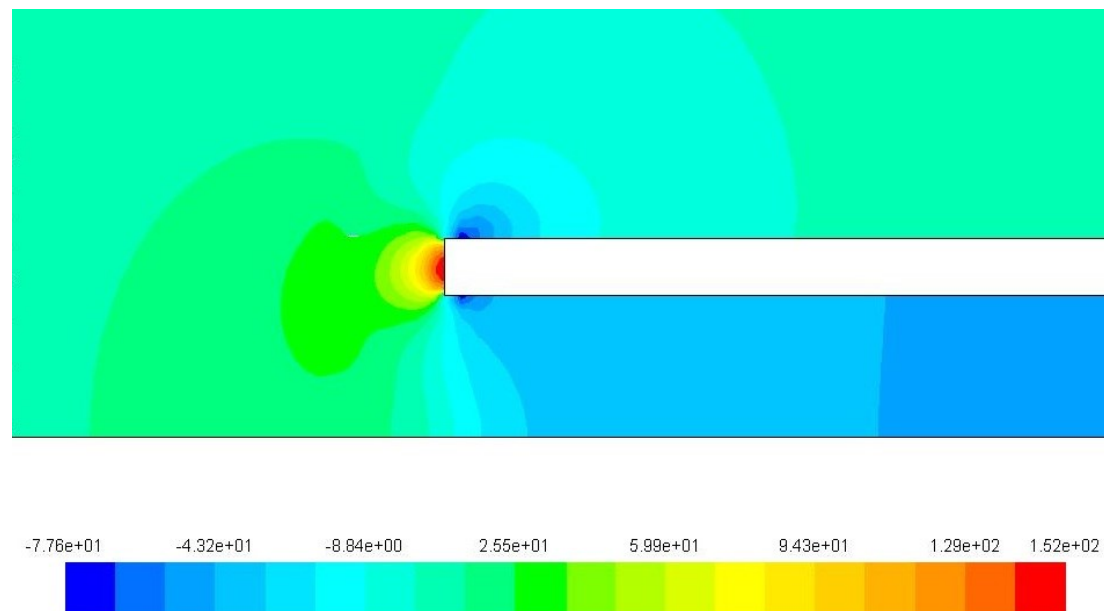
Obr. B. 3 – K-εRealizable – statický tlak [Pa]



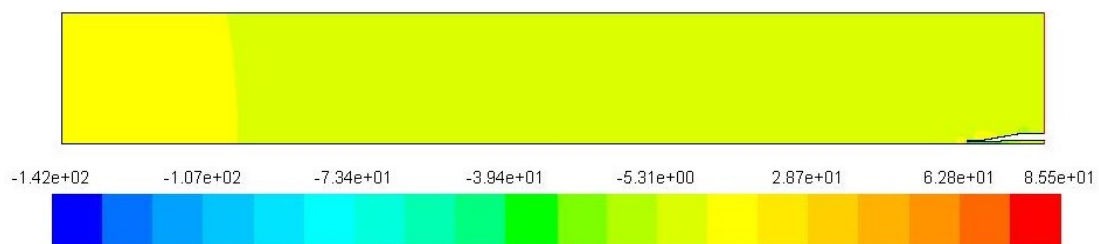
Obr. B. 4 – K-εRealizable – statický tlak-detail [Pa]



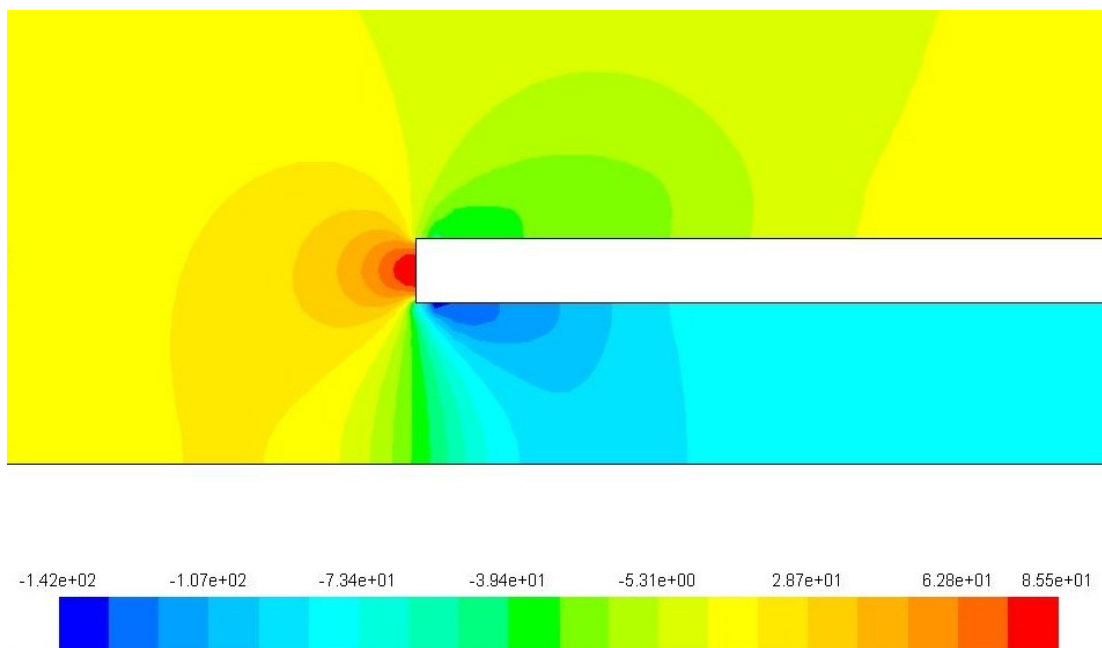
Obr. B. 5 – K- ω Standard – statický tlak [Pa]



Obr. B. 6 – K- ω Standard – statický tlak-detail [Pa]

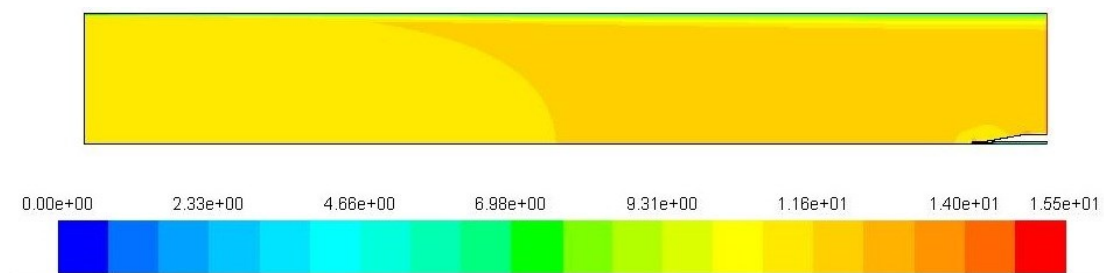


Obr. B. 7 – K- ω SST– statický tlak [Pa]

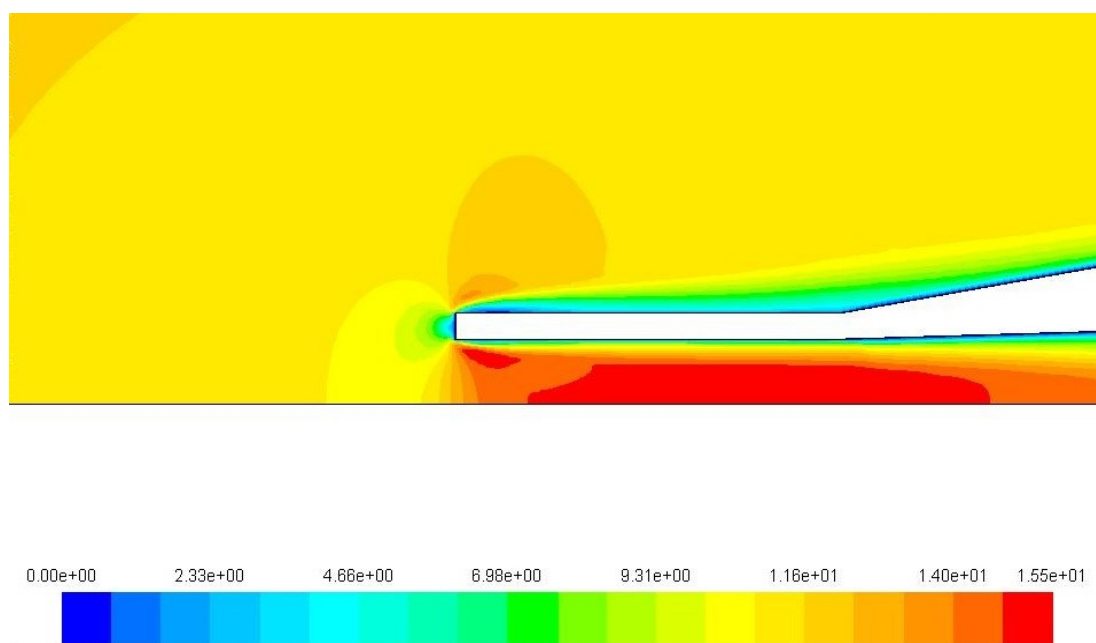


Obr. B. 8 – K- ω SST– statický tlak-detail [Pa]

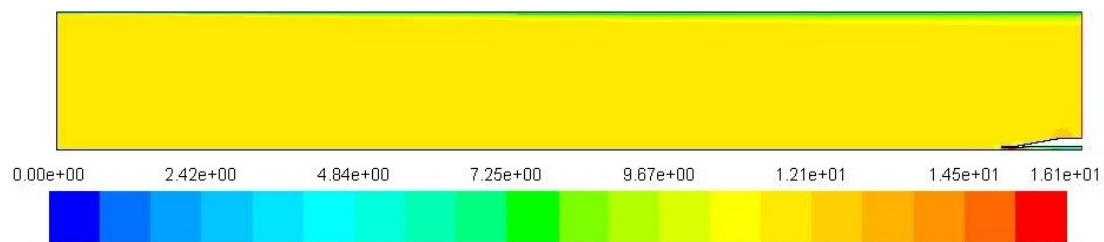
C Zobrazení velikosti rychlosti pro všechny matematické modely



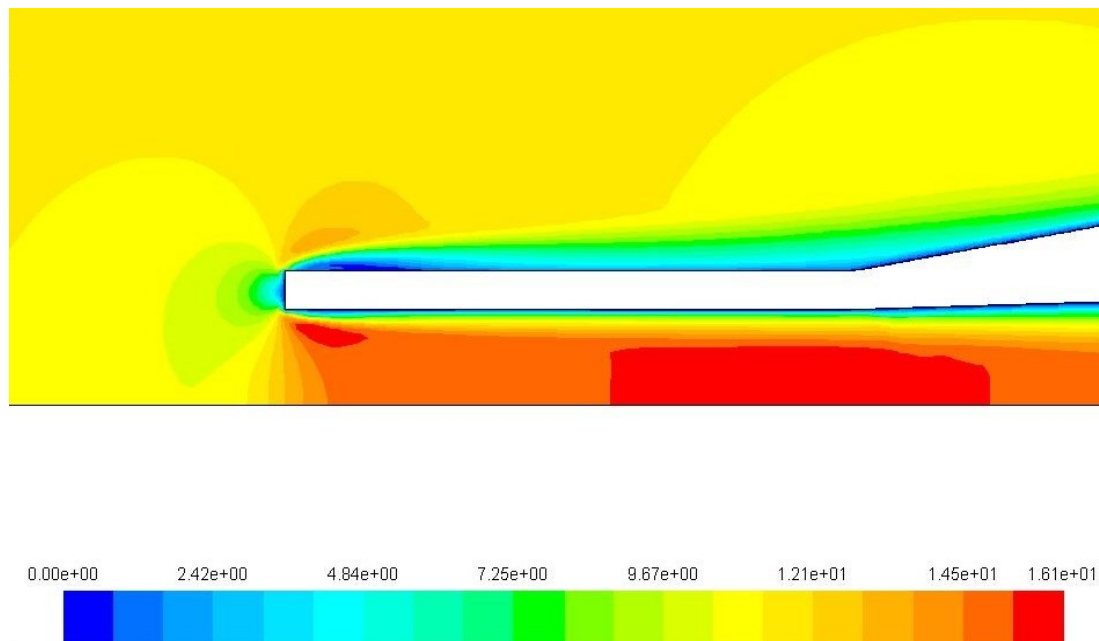
Obr. C. 1 – K-ε Standard – rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]



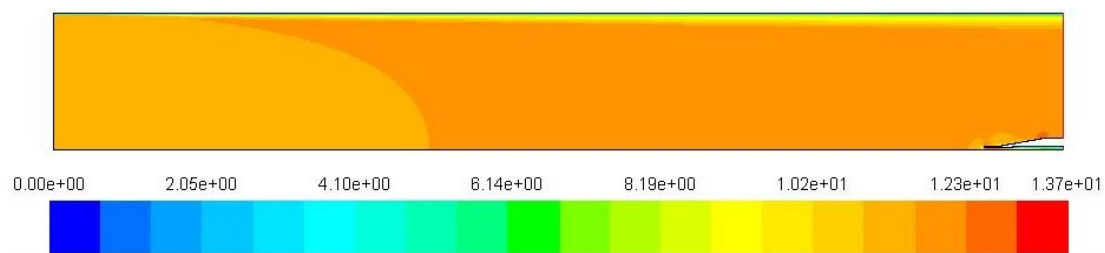
Obr. C. 2 – K-εStandard – rychlost-detail [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]



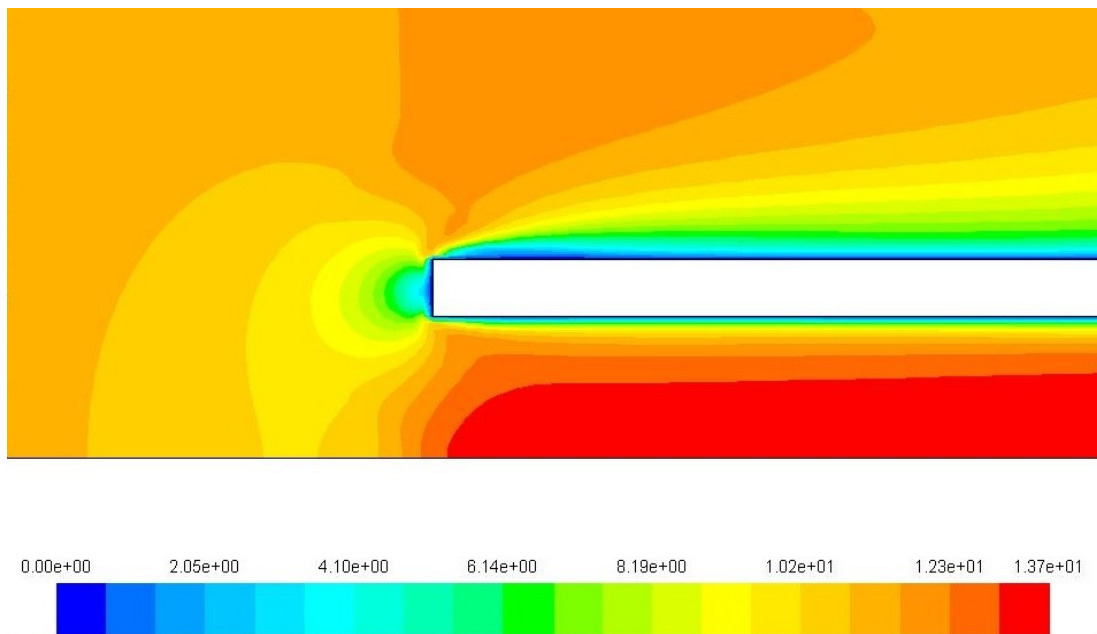
Obr. C. 3 – K-εRealizable – rychlost [m·s⁻¹]



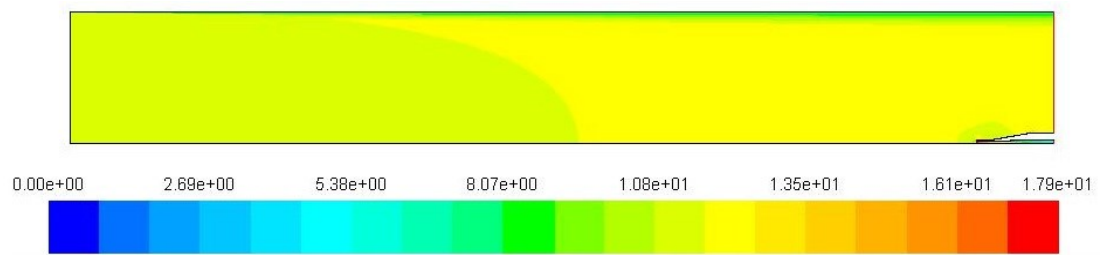
Obr. C. 4 – K-ε Realizable – rychlost-detail [m·s⁻¹]



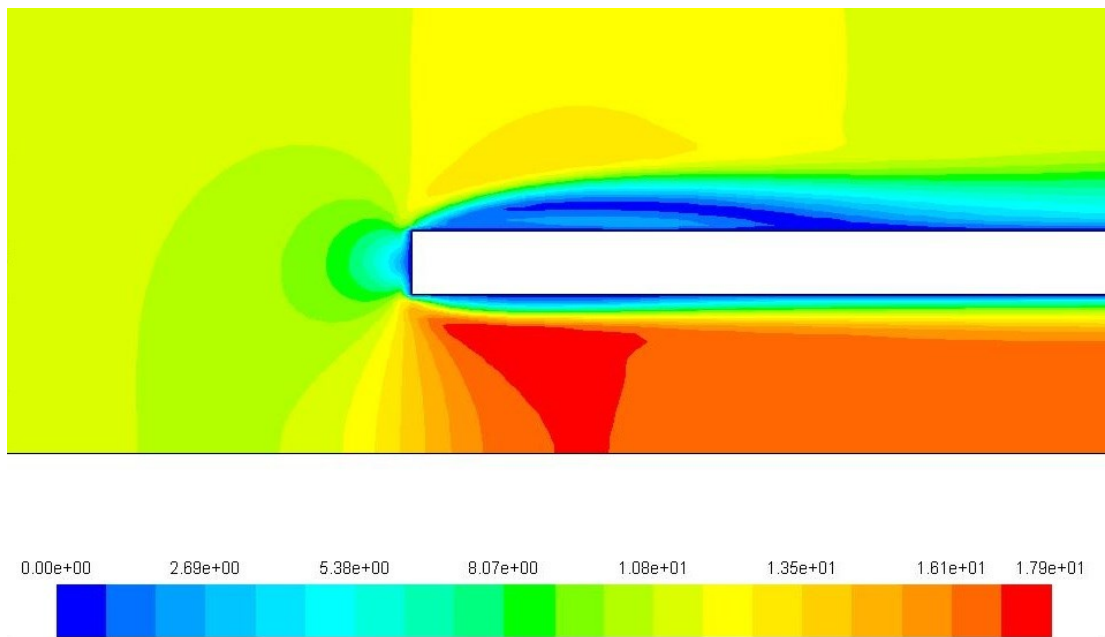
Obr. C. 5 – K- ω Standard – rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]



Obr. C. 6 – K- ω Standard – rychlost-detail [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

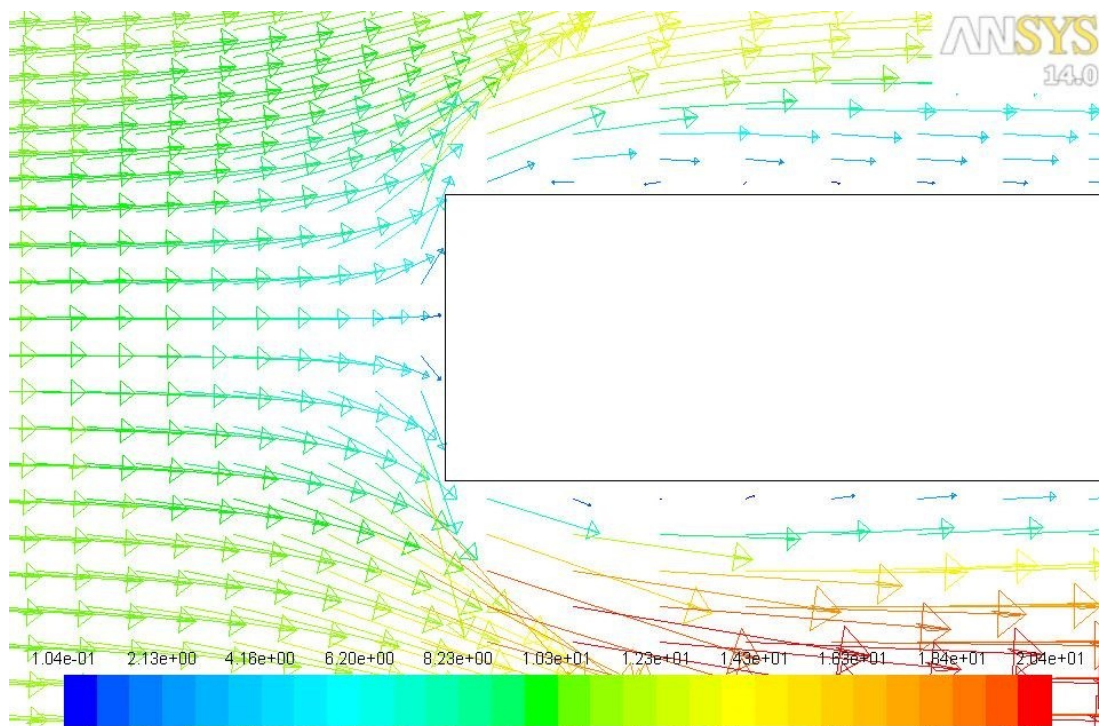


Obr. C. 7 – K- ω SST – rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

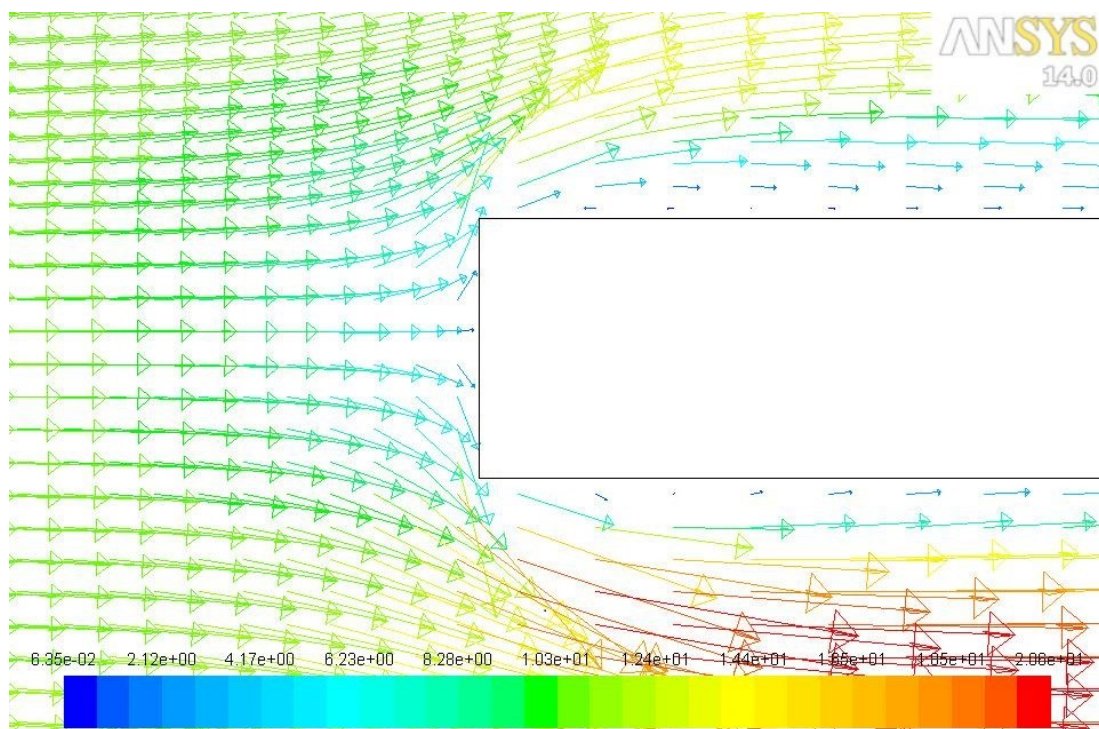


Obr. C. 8 – K- ω SST – rychlost-detail [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

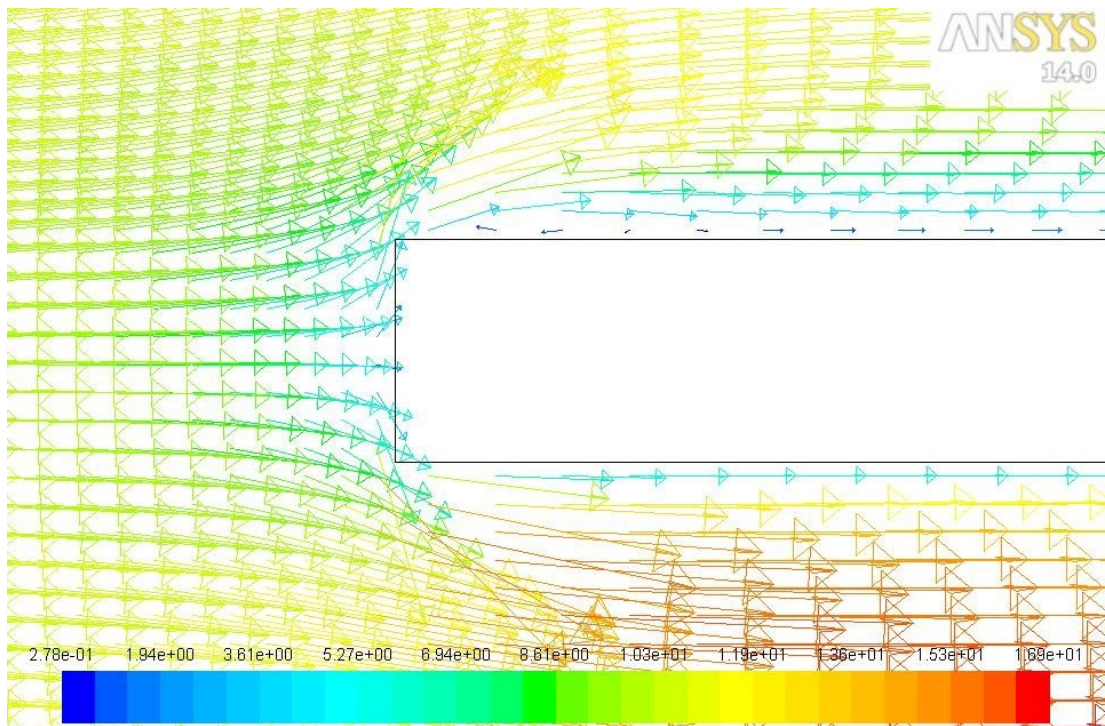
D Zobrazení rychlosti pomocí vektorů pro všechny matematické modely



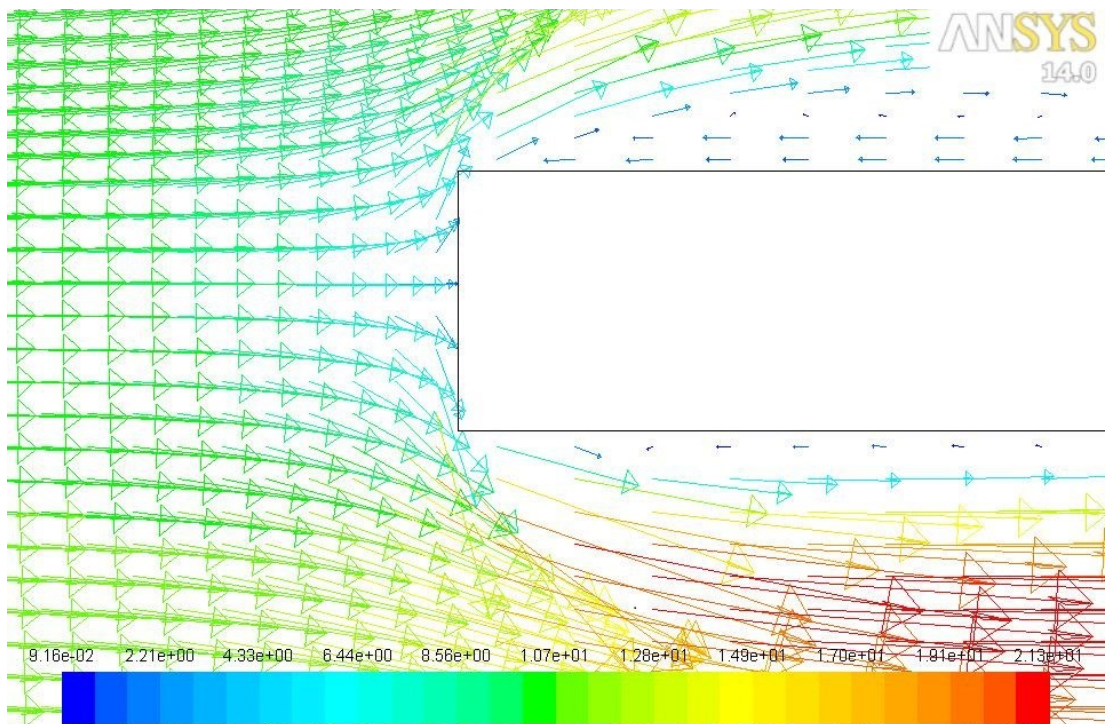
Obr. D. 1 – K-ε Standard – rychlost (detail) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]



Obr. D. 2 – K-ε Raelizable – rychlost (detail) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]



Obr. D. 3 – K- ω Standard – rychlost (detail) [m·s⁻¹]



Obr. D. 4 – K- ω Standard – rychlost (detail) [m·s⁻¹]